CAD/CAM/CAE

工程应用丛书

ANSYS系列

ANSYS 16.0 有限元分析入门·进阶·精通

CAE应用联盟 组编



关注"机械工业出版社计算机分社"官方微信订阅号，即可获得本书配套资源，包含全部案例素材模型文件、结果文件和程序代码。



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

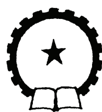
VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书

ANSYS 16.0 有限元分析
入门　进阶　精通

CAE 应用联盟　组编



机 械 工 业 出 版 社

本书以有限元分析方法为基础，结合作者多年的使用和开发经验，通过丰富的工程应用实例，将 ANSYS 16.0 在热分析、结构分析以及电磁场分析等工程领域中的应用详细介绍给读者。

全书共分为三篇 25 个章节，其中基础篇包括 ANSYS 16.0 简介、ANSYS 操作流程和 ANSYS 基础操作介绍；应用篇对稳态热分析、瞬态热分析、热辐射分析、相变分析、静力学分析、模态分析、结构瞬态分析、谐响应分析、谱分析、结构非线性分析、复合材料分析、摩擦生热分析以及电场分析和磁场分析等进行了详解；高级篇则对一些高级应用技术，如耦合场分析、自适应网格划分技术、单元生死技术以及接触分析等进行了介绍。

本书按照深入浅出的原则，通过详细的图形用户界面和命令流的方式对不同的工程应用问题进行了详细讲解，并在讲解过程中穿插“提示”“注意”等，为读者提供了大量的分析方法和使用技巧。本书光盘配有书中实例的有限元模型、APDL 语言代码以及计算结果等，方便读者查阅和参考。

本书内容详实，适合理工院校相关专业的硕士研究生、博士研究生及教师使用，可以作为高等院校学生及科研院所研究人员学习 ANSYS 的教程，也可以作为从事物理场分析领域科学技术研究的工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 16.0 有限元分析入门　进阶　精通 / CAE 应用联盟组编. —北京：机械工业出版社，2016.4

（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）

ISBN 978-7-111-53865-3

Ⅰ. ①A…　Ⅱ. ①C…　Ⅲ. ①有限元分析-应用软件　Ⅳ. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 113550 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦　　责任编辑：张淑谦
责任校对：张艳霞　　责任印制：乔　宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 6 月第 1 版 • 第 1 次印刷
184mm×260mm • 34 印张 • 844 千字
0001－3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-53865-3
定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：（010）88361066	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：（010）68326294	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
（010）88379203	教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版	金 书 网：www.golden-book.com

出 版 说 明

随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

随着计算机科学与应用技术的发展，有限元理论日益完善，随之涌现了一大批比较成熟的通用和专业的有限元计算商业软件。ANSYS 作为著名、通用、有效的商用有限元软件，集结构、传热、流体、电磁、碰撞爆破分析于一体，具有强大的前处理、后处理及计算分析能力，能够进行多场耦合，结构-热、流体-结构、电-磁等物理场的耦合处理求解。

自 1996 年落户中国以来，ANSYS 以其强大的功能、可靠的质量、良好的市场推广，得到了中国 CAE 界的广泛认可和青睐，被用于土木工程、机械制造、汽车工业、水利工程、航空航天、石油化工、生物医学等领域，为各行业的设计研究攻关作出了重要贡献。

本书以 ANSYS 16.0 作为软件平台，对 ANSYS 进行热、结构和电磁场以及它们之间的耦合场分析的理论基础、基本思路、操作步骤和应用技巧进行了介绍，并结合工程应用实例讲述了 ANSYS 具体工程应用方法。

1．本书特点

由浅入深，循序渐进：本书以初中级读者为对象，首先从有限元基本原理及 ANSYS 使用基础讲起，再辅以 ANSYS 在工程中的应用案例帮助读者尽快掌握用 ANSYS 进行有限元分析的技能。

步骤详尽，内容新颖：本书结合作者多年的 ANSYS 使用经验与实际工程应用案例，将 ANSYS 软件的使用方法与技巧详细地讲解给读者。本书步骤讲解详尽、内容新颖，讲解过程中辅以相应的图片，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

实例典型，轻松易学：学习分析案例的具体操作是掌握 ANSYS 最好的方式。本书通过综合应用案例，透彻、详尽地讲解了 ANSYS 在各方面的应用。

本书中的“提示”一般为对前面操作的进一步讲解，利于读者对操作过程的理解。“注意”为操作步骤的注意点，不注意则可能造成操作不成功。另外，本书中每步操作的目的已经在前注明，方便读者理解处理此问题的思想脉络。

2．本书内容

本书在必要的理论概述的基础上，通过大量的典型案例对 ANSYS 分析平台进行详细介绍，并结合实际工程与生活中的常见问题进行详细讲解。全书内容简洁、明快，给人耳目一新的感觉。

本书分为三篇 25 章，主要介绍了 ANSYS 16.0 平台在结构、电磁、热学、耦合场、复合材料等各个领域中的有限元分析及操作过程。

第一篇　基础篇。本篇包括 ANSYS 16.0 简介、ANSYS 操作流程和 ANSYS 基础操作介

绍等，包括以下章节的内容：

第 1 章　ANSYS 16.0 简介　　第 2 章　单元和材料属性
第 3 章　坐标系和工作平面　　第 4 章　创建几何模型
第 5 章　建立有限元模型　　第 6 章　施加载荷
第 7 章　求解计算　　第 8 章　后处理

第二篇　应用篇。本篇对稳态热分析、瞬态热分析、辐射热分析、相变分析、静力分析、模态分析、结构瞬态分析、谱分析、谐响应分析、结构非线性分析、复合材料分析、摩擦生热分析以及电磁场分析分类进行了详解，包括以下章节的内容：

第 9 章　稳态热分析　　第 10 章　瞬态热分析
第 11 章　热辐射分析　　第 12 章　相变分析
第 13 章　静力学分析　　第 14 章　模态分析
第 15 章　结构瞬态分析　　第 16 章　谐响应分析与谱分析
第 17 章　结构非线性分析　　第 18 章　复合材料分析
第 19 章　摩擦生热分析　　第 20 章　电场分析
第 21 章　磁场分析

第三篇　高级篇。本篇对一些高级应用技术，如耦合场分析、自适应网格划分技术、单元生死技术以及接触分析等进行了介绍，包括以下章节的内容：

第 22 章　耦合场分析　　第 23 章　自适应网格划分技术
第 24 章　单元生死技术　　第 25 章　接触分析

3．附赠网盘内容

本书附赠网盘包括所有练习实例的有限元模型、APDL 语言代码及计算结果，供读者在学习过程中直接导入使用，以减少建立几何模型的烦琐操作，使读者轻松快捷地掌握 ANSYS 有限元分析的操作技巧和应用方法。

相关文件放于相应章节的目录中，以方便读者查询。例如，第 22 章的第 2 个操作实例“实例 2-钢水凝固过程热应力分析”的几何文件和工程项目管理文件放置在“网盘文件\Chapter22\char22-2\”路径的文件夹下。

4．读者对象

本书适合于 ANSYS 16.0 初学者和期望提高有限元分析及建模仿真工程应用能力的读者，具体说明如下：

★ 初学 ANSYS 的技术人员
★ 大中专院校的教师和在校生　　★ 相关培训机构的教师和学员
★ 参加工作实习的“菜鸟”　　★ ANSYS 爱好者
★ 广大科研工作人员　　★ 初、中级 ANSYS 从业人员

5．读者服务

为了方便解决本书疑难问题，读者若在学习过程中遇到与本书有关的技术问题，则可以发邮件到邮箱 caxart@126.com，或者访问博客 http://blog.sina.com.cn/caxart，编者会尽快给予解答，我们将竭诚为您服务。

6．本书作者

本书主要由丁金滨编著，张建伟、丁伟、刘浩、王芳、韩希强、张岩、唐家鹏、石良臣、王菁、郭海霞、李昕、刘成柱、沈再阳、林金宝、高飞、宋玉旺、张文电、张亮亮、于苍海和孙国强也参与了本书的编写工作，在此一并表示感谢。

ANSYS 本身是一个庞大的资源库与知识库，本书虽然卷帙浩繁，仍难窥其全貌。加之编者水平有限、时间仓促，书中错误与缺点在所难免，敬请广大读者批评指正，也欢迎广大同行来电来信共同交流探讨。

最后再次希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

编　者

目　　录

出版说明

前言

基　础　篇

第 1 章　ANSYS 16.0 简介 …… **1**
1.1　ANSYS 发展历程及功能简介 …… **1**
1.1.1　发展历程 …… **1**
1.1.2　主要功能 …… **2**
1.1.3　ANSYS 16.0 新功能 …… **3**
1.2　典型的 ANSYS 操作流程 …… **5**
1.2.1　ANSYS 的启动 …… **5**
1.2.2　ANSYS 用户界面介绍 …… **6**
1.2.3　ANSYS 操作流程 …… **7**
1.3　ANSYS 分析案例详解 …… **9**
1.3.1　问题描述 …… **9**
1.3.2　问题分析 …… **10**
1.3.3　GUI 操作步骤 …… **10**
1.3.4　APDL 命令流程序 …… **19**
第 2 章　单元和材料属性 …… **21**
2.1　单元类型 …… **21**
2.2　单元定义方法 …… **22**
2.3　定义材料属性 …… **24**
2.3.1　材料属性 …… **24**
2.3.2　材料属性定义命令 …… **24**
2.4　本章小结 …… **27**
第 3 章　坐标系和工作平面 …… **28**
3.1　坐标系简介 …… **28**
3.1.1　总体坐标系和局部坐标系 …… **28**
3.1.2　显示坐标系 …… **31**
3.1.3　节点坐标系 …… **32**
3.1.4　单元坐标系 …… **32**
3.1.5　结果坐标系 …… **32**
3.2　工作平面的使用 …… **32**
3.2.1　定义一个新的工作平面 …… **33**
3.2.2　列表工作平面信息 …… **33**
3.2.3　移动工作平面 …… **33**
3.2.4　旋转工作平面 …… **34**
3.3　本章小结 …… **34**
第 4 章　创建几何模型 …… **35**
4.1　概述 …… **35**
4.2　建立基本图元 …… **36**
4.3　拖拽方式建立模型 …… **46**
4.4　图元的选取 …… **47**
4.5　布尔操作 …… **51**
4.6　其他操作 …… **53**
4.7　本章小结 …… **55**
第 5 章　建立有限元模型 …… **56**
5.1　网格划分方法和步骤 …… **56**
5.1.1　网格划分方法 …… **56**
5.1.2　网格化的一般步骤 …… **57**
5.2　MeshTool 工具 …… **58**
5.3　Meshing 子菜单 …… **60**
5.4　直接生成有限元模型 …… **67**
5.5　本章小结 …… **68**
第 6 章　施加载荷 …… **69**
6.1　载荷概述 …… **69**
6.1.1　载荷施加对象 …… **69**
6.1.2　载荷分类 …… **69**
6.1.3　载荷步、子步和平衡迭代 …… **70**
6.1.4　时间参数 …… **71**
6.2　载荷的施加和删除等操作 …… **71**
6.2.1　常数载荷的施加 …… **71**
6.2.2　利用表格和函数施加载荷 …… **79**
6.2.3　多步载荷操作 …… **80**
6.2.4　删除载荷 …… **81**
6.2.5　其他操作 …… **82**

6.3 本章小结 ………………………………… 82
第 7 章 求解计算………………………………… 83
7.1 求解设置 ………………………………… 83
7.1.1 新分析 ………………………………… 83
7.1.2 求解控制………………………………… 84
7.1.3 输出设置………………………………… 87
7.2 求解过程处理………………………………… 88
7.2.1 求解概述………………………………… 88
7.2.2 求解当前载荷步………………………………… 88
7.2.3 多载荷步求解 ………………………………… 89
7.3 本章小结 ………………………………… 90
第 8 章 后处理 ………………………………… 91
8.1 后处理概述………………………………… 91
8.1.1 通用后处理器………………………………… 91
8.1.2 时间-历程后处理器………………………………… 92
8.2 通用后处理器………………………………… 92
8.2.1 结果文件读入通用后处理器……… 92
8.2.2 设置结果输出方式………………………………… 93
8.2.3 图形显示计算结果………………………………… 94
8.2.4 列表显示计算结果………………………………… 96
8.2.5 结果查看器………………………………… 98
8.2.6 基于单元表的结果处理……………… 99
8.2.7 基于路径的结果处理 ……………… 101
8.3 时间-历程后处理器 ……………… 102
8.3.1 时间-历程后处理器概述 ………… 102
8.3.2 进入时间-历程后处理……………… 103
8.3.3 定义时间—历程变量 ……………… 103
8.3.4 时间-历程变量的处理……………… 104
8.3.5 显示和列表时间-历程变量曲线 … 105
8.3.6 时间-历程变量观察器……………… 105
8.4 本章小结………………………………… 107

应 用 篇

第 9 章 稳态热分析………………………… 108
9.1 稳态热分析概述………………………… 108
9.2 稳态热分析基本步骤……………… 108
9.3 实例——铀燃料管冷却计算 ….. 109
9.3.1 问题描述………………………………… 109
9.3.2 问题分析………………………………… 110
9.3.3 GUI 操作步骤………………………… 110
9.3.4 APDL 命令流程序………………………… 133
9.4 本章小结 ………………………………… 137
第 10 章 瞬态热分析………………………… 138
10.1 瞬态热分析概述………………………… 138
10.1.1 瞬态热分析特性 ………………………… 138
10.1.2 控制方程 ………………………………… 139
10.1.3 时间积分与时间步长预测……… 139
10.1.4 数值求解过程 ………………………… 140
10.1.5 初始条件的施加 ………………………… 141
10.1.6 求解选项的设置 ………………………… 142
10.1.7 瞬态分析准确程度的评估……… 143
10.2 瞬态热分析基本过程……………… 143
10.3 实例——温度控制加热器工作过程分析………………………………… 144
10.3.1 问题描述 ………………………………… 144
10.3.2 问题分析 ………………………………… 145
10.3.3 GUI 操作步骤………………………… 145
10.3.4 APDL 命令流程序 ………………… 155
10.4 本章小结………………………………… 157
第 11 章 热辐射分析 ………………………… 158
11.1 热辐射分析概述 ………………………… 158
11.1.1 热辐射特性………………………………… 158
11.1.2 热辐射基本术语 ………………………… 158
11.2 ANSYS 中进行辐射分析 ……… 161
11.2.1 ANSYS 中热辐射的处理方法….. 161
11.2.2 ANSYS 中进行辐射分析的几个概念 ………………………………… 161
11.2.3 使用辐射线单元建立辐射模型 … 163
11.2.4 使用表面效应单元建立辐射模型 ………………………………… 163
11.2.5 使用辐射矩阵单元建立辐射模型 ………………………………… 165
11.2.6 使用光能传递求解方法建立辐射模型 ………………………………… 169
11.3 实例——非同心圆环间的辐射

传热分析……172
11.3.1 问题描述……172
11.3.2 问题分析……173
11.3.3 GUI 操作步骤……173
11.3.4 APDL 命令流程序……180
11.4 本章小结……181
第 12 章 相变分析……182
12.1 相变基本理论……182
12.2 ANSYS 中的相变分析基本思路及求解设置……183
12.2.1 相变分析基本思路……183
12.2.2 求解设置……185
12.3 实例——水结冰过程分析……187
12.3.1 问题描述……187
12.3.2 问题分析……188
12.3.3 GUI 操作步骤……188
12.3.4 APDL 命令流程序……200
12.4 本章小结……202
第 13 章 静力学分析……203
13.1 有限元线性分析基本理论……203
13.1.1 线性本构关系（广义虎克定律）……203
13.1.2 线性几何方程（小变形情况）……204
13.1.3 平衡方程（虚功原理）……204
13.2 实例 1——带孔板静力分析……205
13.2.1 问题描述……205
13.2.2 问题分析……206
13.2.3 GUI 操作步骤……206
13.2.4 APDL 命令流程序……211
13.3 实例 2——多载荷作用下的阶梯轴分析……212
13.3.1 问题描述……212
13.3.2 问题分析……212
13.3.3 GUI 操作步骤……212
13.3.4 APDL 命令流程序……218
13.4 实例 3——惯性载荷作用下的叶轮受力分析……219
13.4.1 问题描述……220
13.4.2 问题分析……220
13.4.3 GUI 操作步骤……220
13.4.4 APDL 命令流程序……223
13.5 实例 4——静载荷作用下的简支梁……224
13.5.1 问题描述……224
13.5.2 问题分析……224
13.5.3 GUI 操作步骤……224
13.5.4 APDL 命令流程序……229
13.6 本章小结……230
第 14 章 模态分析……231
14.1 结构动力学分析概述……231
14.2 模态分析简介及操作步骤……232
14.2.1 模态分析原理……232
14.2.2 模态分析步骤……233
14.3 实例 1——连杆的模态分析……234
14.3.1 问题描述……235
14.3.2 问题分析……235
14.3.3 GUI 操作步骤……235
14.3.4 APDL 命令流程序……240
14.4 实例 2——框架式建筑物有预应力的模态分析……241
14.4.1 问题描述……241
14.4.2 问题分析……241
14.4.3 GUI 操作步骤……241
14.4.4 APDL 命令流程序……248
14.5 本章小结……250
第 15 章 结构瞬态分析……251
15.1 概述……251
15.1.1 瞬态动力学分析的基本理论……251
15.1.2 求解方法及其优缺点……252
15.1.3 瞬态分析积分步长选取准则……254
15.2 实例 1——冲击载荷作用下的管子……255
15.2.1 问题描述……255
15.2.2 问题分析……255
15.2.3 GUI 操作步骤……255
15.2.4 APDL 命令流程序……266
15.3 实例 2——压力容器瞬态分析……268
15.3.1 问题描述……268
15.3.2 问题分析……268

15.3.3 GUI 操作步骤 …… 268
15.3.4 APDL 命令流程序 …… 276
15.4 本章小结 …… 277
第 16 章 谐响应分析与谱分析 …… 278
16.1 概述 …… 278
16.1.1 谐响应分析的定义与应用 …… 278
16.1.2 谱分析的定义与应用 …… 278
16.2 谐响应分析 …… 279
16.3 实例 1——"工作台—电动机"系统谐响应分析 …… 280
16.3.1 问题描述 …… 280
16.3.2 问题分析 …… 281
16.3.3 GUI 操作步骤 …… 281
16.3.4 APDL 命令流程序 …… 289
16.4 谱分析 …… 292
16.5 实例 2——板梁结构单点地震响应谱分析 …… 293
16.5.1 问题描述 …… 293
16.5.2 问题分析 …… 293
16.5.3 GUI 操作步骤 …… 293
16.5.4 APDL 命令流程序 …… 301
16.6 本章小结 …… 303
第 17 章 结构非线性分析 …… 304
17.1 非线性问题概述与基础理论 …… 304
17.1.1 结构非线性的定义 …… 304
17.1.2 结构非线性类型 …… 305
17.1.3 求解基本原理 …… 306
17.2 实例 1——弹簧变形分析 …… 309
17.2.1 问题描述 …… 309
17.2.2 问题分析 …… 309
17.2.3 GUI 操作步骤 …… 309
17.2.4 APDL 命令流程序 …… 313
17.3 实例 2——碰撞分析 …… 313
17.3.1 问题描述 …… 313
17.3.2 问题分析 …… 314
17.3.3 GUI 操作步骤 …… 314
17.3.4 APDL 命令流程序 …… 319
17.4 实例 3——电子产品跌落分析 …… 321
17.4.1 问题描述 …… 321
17.4.2 问题分析 …… 321
17.4.3 GUI 操作步骤 …… 321
17.4.4 APDL 命令流程序 …… 328
17.5 本章小结 …… 331
第 18 章 复合材料分析 …… 332
18.1 复合材料概述 …… 332
18.1.1 复合材料的定义及分类 …… 332
18.1.2 复合材料的性能及用途 …… 333
18.1.3 树脂基和金属基复合材料 …… 334
18.2 实例——高体积分数 SiCp/Al 热残余应力分析 …… 335
18.2.1 问题描述 …… 335
18.2.2 问题分析 …… 335
18.2.3 GUI 操作步骤 …… 335
18.2.4 APDL 命令流程序 …… 340
18.3 复合材料的层合板 …… 342
18.4 本章小结 …… 343
第 19 章 摩擦生热分析 …… 344
19.1 摩擦生热在 ANSYS 中的计算方法 …… 344
19.2 实例——物体滑动中的摩擦生热分析 …… 344
19.2.1 问题描述 …… 344
19.2.2 问题分析 …… 345
19.2.3 GUI 操作步骤 …… 345
19.2.4 APDL 命令流程序 …… 355
19.3 本章小结 …… 357
第 20 章 电场分析 …… 358
20.1 电场分析概述 …… 358
20.2 电场分析基本步骤 …… 359
20.3 实例 1——导电圆盘的电场分布分析 …… 360
20.3.1 问题描述 …… 360
20.3.2 问题分析 …… 360
20.3.3 GUI 操作步骤 …… 360
20.3.4 APDL 命令流程序 …… 364
20.4 实例 2——屏蔽带状传输线静电场分析 …… 365
20.4.1 问题描述 …… 365

20.4.2 问题分析 …… 365
20.4.3 GUI 操作步骤 …… 365
20.4.4 APDL 命令流程序 …… 373
20.5 本章小结 …… 375
第 21 章 磁场分析 …… 376
21.1 概述 …… 376
21.1.1 磁场分析分类 …… 376
21.1.2 计算方法 …… 377
21.2 实例——电磁沟槽电磁力分析 …… 378
21.2.1 问题描述 …… 378
21.2.2 问题分析 …… 378
21.2.3 GUI 操作步骤 …… 378
21.2.4 APDL 命令流程序 …… 385
21.3 本章小结 …… 386

高　级　篇

第 22 章 耦合场分析 …… 387
22.1 耦合场分析概述 …… 387
22.1.1 耦合场分析的定义 …… 387
22.1.2 耦合场分析的类型 …… 387
22.1.3 直接和间接耦合法的应用范围 …… 390
22.2 间接耦合分析 …… 392
22.2.1 间接耦合分析的特点 …… 392
22.2.2 间接耦合分析的基本过程 …… 392
22.2.3 间接耦合分析的基本操作步骤 …… 394
22.2.4 使用物理环境运行间接耦合场分析 …… 396
22.3 直接耦合分析 …… 397
22.4 实例 1——多层热套压力容器的热应力耦合分析 …… 398
22.4.1 问题描述 …… 398
22.4.2 问题分析 …… 398
22.4.3 GUI 操作步骤 …… 399
22.4.4 APDL 命令流程序 …… 411
22.5 实例 2——钢水凝固过程热应力耦合分析 …… 416
22.5.1 问题描述 …… 416
22.5.2 问题分析 …… 417
22.5.3 GUI 操作步骤 …… 417
22.5.4 APDL 命令流程序 …… 429
22.6 实例 3——圆柱形坯料的电热耦合分析 …… 431
22.6.1 问题描述 …… 431
22.6.2 问题分析 …… 432
22.6.3 GUI 操作步骤 …… 432
22.6.4 APDL 命令流程序 …… 449
22.7 实例 4——冷却器电热耦合分析 …… 453
22.7.1 问题描述 …… 453
22.7.2 问题分析 …… 454
22.7.3 GUI 操作步骤 …… 454
22.7.4 APDL 命令流程序 …… 461
22.8 本章小结 …… 462
第 23 章 自适应网格划分技术 …… 463
23.1 自适应网格划分技术简介 …… 463
23.1.1 自适应网格划分技术的定义 …… 463
23.1.2 自适应网格划分的先决条件 …… 463
23.1.3 自适应网格划分技术的应用方法 …… 464
23.1.4 定制 ADAPT 宏（UADAPT.MAC） …… 466
23.1.5 自适应网格划分的一些说明 …… 467
23.2 实例——二维对流传热的自适应分析 …… 468
23.2.1 问题描述 …… 468
23.2.2 问题分析 …… 468
23.2.3 GUI 操作步骤 …… 469
23.2.4 APDL 命令流程序 …… 473
23.3 本章小结 …… 474
第 24 章 单元生死技术 …… 475
24.1 单元生死技术概述 …… 475
24.1.1 单元的生和死的定义 …… 475
24.1.2 单元生死的基本原理 …… 476
24.1.3 单元生死技术的应用方法 …… 476

24.1.4 使用 ANSYS 结果控制单元生死… 479
24.1.5 单元生死技术的注意事项………… 479
24.2 实例——利用单元生死技术堆积单元模拟焊接过程………… 480
24.2.1 问题描述……………………………… 480
24.2.2 问题分析……………………………… 481
24.2.3 GUI 操作步骤……………………… 481
24.2.4 APDL 命令流程序………………… 506
24.3 本章小结………………………………… 516
第 25 章 接触分析……………………………… 517
25.1 概述……………………………………… 517
25.1.1 接触的定义及分类………………… 517
25.1.2 接触协调条件……………………… 518
25.1.3 接触单元…………………………… 518
25.1.4 选择接触面和目标面的原则……… 518
25.1.5 接触向导…………………………… 519
25.2 实例——轨道车辆车轮与钢轨接触……………………………………… 520
25.2.1 问题描述…………………………… 520
25.2.2 问题分析…………………………… 521
25.2.3 GUI 操作步骤……………………… 521
25.2.4 APDL 命令流程序………………… 529
25.3 本章小结………………………………… 531

基 础 篇



第1章 ANSYS 16.0 简介

ANSYS 软件具备电、磁、热、结构、声学和流场等多物理场分析的功能，主要包括前处理、求解和后处理 3 个处理模块。本章首先对 ANSYS 软件的发展历程和主要功能作简单介绍；然后详细介绍 ANSYS 软件的主要操作流程和用户界面；最后，通过一个案例使读者对 ANSYS 软件的用户界面以及分析操作过程有个基本了解。

学习目标：

（1）了解 ANSYS 发展历程及主要功能；

（2）熟悉 ANSYS 用户界面；

（3）掌握 ANSYS 基本操作流程。

1.1 ANSYS 发展历程及功能简介

ANSYS软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件，它能与多数 CAD软件接口实现数据的共享和交换，如 Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS、AutoCAD 等，是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。

1.1.1 发展历程

ANSYS 公司成立于 1970 年，总部位于美国宾夕法尼亚州的匹兹堡，目前全球拥有 60 多个代理，在 40 多个国家销售产品。ANSYS 公司主要致力于工程仿真软件和技术研发，其产品在全球众多行业中被工程师和设计师广泛采用。ANSYS 公司重点开发开放、灵活、对设计直接进行仿真的解决方案，提供从概念设计到最终测试产品研发全过程的统一平台，同时追求快速、高效和成本意识的产品开发。

2006 年，ANSYS 公司收购了在流体仿真领域处于领先地位的美国 Fluent 公司， 2008 年又收购了在电路和电磁仿真领域处于领导地位的美国 Ansoft 公司。通过整合，ANSYS 公司已成为全球最大的仿真软件公司。

目前，ANSYS 整个产品线包括结构分析（ANSYS Mechanical）系列、流体动力学（ANSYS CFD（FLUENT/CFX））系列、电子设计（ANSYS ANSOFT）系列以及 ANSYS Workbench 和 EKM 等，产品广泛应用于航空、航天、电子、车辆、船舶、交通、通信、建筑、电子、医疗、国防、石油、化工等众多行业。

1.1.2 主要功能

目前，ANSYS 软件可以处理的分析类型有以下几类。

1．结构分析

结构分析首先待求的自由度是位移，而其他量诸如应变、应力、反应力等均是通过位移值来得到的。在 ANSYS 中，结构分析主要包括以下 7 种。

- 静力分析（Static Analysis）：用于静力载荷下位移、应力的求解，可以考虑线性和非线性行为，如塑形、应力钢化、蠕变、大变形、大应变、超弹性和接触等。
- 模态分析（Modal Analysis）：用于计算结构的自然频率和振形。
- 谱分析（Spectrum Analysis）：是模态分析的扩展，用于计算由于随机震动引起的应力和应变，也叫作响应谱或 PSD，是模态分析的发展。
- 瞬态动力学分析（Transient Dynamic Analysis）：用于确定结构对随时间任意变化的载荷的响应，可以考虑静态分析时的所有非线性特征。
- 谐响应分析（Harmonic Analysis）：用于确定结构对随时间按正弦变化的载荷响应。
- 特征屈曲分析（Buckling Analysis）：用于计算屈曲载荷并确定屈曲模态形状，线性屈曲和非线性屈曲均可以考虑。
- 专项分析（Explicit Dynamic Analysis）：断裂分析、复合材料分析和疲劳分析。用于模拟非常大的变形、惯性力占支配地位，并考虑所有的非线性行为。它的显式方程求解冲击、碰撞、快速成型等问题，是目前这类问题最有效的解决方法，在 ANSYS LS-DYNA 中可用。

2．热分析

热分析在许多工程设计中扮演着非常重要的作用，包括内燃机的设计、涡轮机的设计、热交换器的设计、管道系统的设计和电子元件的设计等。

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他物理量，主要参数有温度分布、体系热量的增加或损失、热梯度、热流密度等。很多设计中，热分析完成之后将进行结构分析，计算由于膨胀或收缩而引起的热应力。

ANSYS 使用有限元法计算体系各节点的温度分布，进而导出其他物理参数，可以处理 3 种热传递方式：热传导、热对流和热辐射。除了这 3 种热传递方式，ANSYS 还可以考虑材料固化和溶解过程的相变、焦耳热、摩擦生热等热效应对体系温度场的影响。ANSYS 支持以下两种典型的热分析类型。

- 稳态热分析（Steady-state thermal analysis）：用于确定稳态条件下的温度分布及其他热特性，稳态条件是指热量随时间的变化可以忽略。
- 瞬态热分析（Transient-state thermal analysis）：计算热量随时间变化的条件下，温度的分布和热特性。

3．电磁分析

主要用于电磁场问题的分析，如电感、电容、磁通量密度、涡流、电场分布、磁力线分布、力、运动效应、电路和能量损失等，应用于螺线管、调节器、发电机、变换器、磁体、加速器、电解槽及无损检测装置等的设计和分析领域。电磁分析可以分为以下几种类型。

- 静磁场分析（Static magnetic analysis）：用于计算由直流电或永磁体产生的磁场。
- 交变磁场分析（Harmonic magnetic analysis）：用于计算由交流电产生的磁场。
- 瞬态磁场分析（Transient magnetic analysis）：用于计算由随时间变化的电流或外界引发的磁场。
- 高频电磁场分析（High-Frequency electromagnetic analysis）：用于微波及 RF 无源组件、波导、雷达系统、同轴连接器等分析。

4．流体分析

ANSYS 流体单元能进行流体动力学分析，分析类型可以为瞬态或稳态，分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流率，并且可以利用后处理功能产生压力、流率和温度分布的图形显示。另外，还可以使用三维表面效应单元和热－流管单元模拟结构的流体绕流，包括对流换热效应。流体分析分为以下几类。

- CFD-ANSYS/FLOTRAN：提供强大的计算流体力学分析功能，包括不可压缩或可压缩流体、层流及湍流、多组分流等。
- 声学分析：考虑流体介质与周围固体的相互作用，进行声波或水下结构的动力学分析等。
- 容器内流体分析：考虑容器内的非流动流体的影响，可以确定由于晃动引起的静水压力。
- 流体动力学耦合分析：在考虑流体约束质量的动力响应基础上，在结构动力学分析中使用流体耦合单元。

5．耦合场分析

耦合分析可以考虑两个或多个物理场之间的相互作用。如果物理量之间相互影响，单独求解一个不可能得到正确的结果，因此需要相互组合到一起进行求解。ANSYS 中可以进行以下几种耦合场分析。

- 电-热分析。
- 热-应力分析。
- 感应加热（电磁-热），感应震荡。
- 电-磁分析。
- 流体-结构分析。

1.1.3 ANSYS 16.0 新功能

ANSYS 为每个学科提供市场领先的、具备功能深度和广度的解决方案，同时可实现跨越各个学科的集成仿真，可以将机械、流体、热、电磁等的仿真结果嵌入到系统中进行整个系统的虚拟原形设计。2015 年 2 月 27 日，ANSYS 公司推出最新版本：ANSYS 16.0。经过一段时间的发展，ANSYS 16.0 版本可以提供一个整体的仿真环境来实现完备的虚拟仿真。

在电子设计与仿真方面，ANSYS 16.0 改进的 HPC 和 FA-DDM 变得更高效、更智能。其速度和内存效率都得到了显著提升，并且可以自动优化计算资源，支持多层并行。在 ANSYS 16.0 中，测试一个 80×80 Vivaldi 阵列天线仿真，其中有超过 1 亿的未知量和 1900

万网格，可以在 1.5h 内结束测试，速度提升 2.2 倍，内存消耗减少 5.4 倍，消耗不到 1%，提升非常大。

另外，ANSYS 16.0 还开发出了各种各样的设计平台，帮助用户更快地解决工程实际问题，主要包括以下几个方面。

（1）在电磁兼容设计平台中，可以将原来电机的 Map 图仿真时间由十天缩短到一天，而且实际操作时间只需要 30min 左右就可以完成。

（2）在流体仿真方面拥有了更快的速度，特别是工程方面，大大缩短了实际的工程时间，以 ANSYS 15.0 和 ANSYS 16.0 作对比，整个仿真的各个流程阶段的时间都显著缩短，比原来减少 40%以上。

1）网格划分速度提升：案例中的发动机网格划分速度提高了 5～10 倍。原来做网格需要几天时间，而现在可以在 24h 内完成。

2）求解速度：涡轮机械的流体仿真求解速度提高了 30%～40%。

3）最大限度地实现了高性能计算。在同类产品里面，其他软件最多只能支持 200 个 CPU 核的计算，而 ANSYS 16.0 则极大地超越了这个数量级，所以整个工程仿真的时效都有了极大的提升。

4）流体仿真-化学物质的反应：拥有化学反应模型以及燃烧模型，通过这个工具可以对化学反应（比如内燃机的排放）等方面进行模拟仿真，并且整体的仿真速度快，使用方便，内存消耗少，能够得到非常准确的符合工程实践的结果。

5）流体仿真-形状优化与伴随求导：形状优化可以实现不同的工况，特别是流体局部的变化情况的仿真，例如赛车在赛道里面运动的时候，有直行、转弯等不同的工况。现在新的 ANSYS 16.0 版本可以更方便、更直接地在这些工况下进行优化，而且效率更高。

（3）在结构仿真方面，ANSYS 16.0 也有非常多的改进。

1）新的网格剖分技术、稳健的壳单元和四面体网格。

2）基于四面体网格的断裂仿真：该特性对于复杂的结构适应性非常好。对于断裂仿真，它的结构非常复杂，现在新的版本可以利用四面体网格充分体验物体的特性。

3）非线性接触仿真：在非线性仿真方面也有显著的改进。对于钢缆架非线性接触仿真，ANSYS 16.0 比竞争对手快 40%以上。

4）非线性自适应网格重构：新的版本里面网格的重构过程完全自动化。

5）复合材料的高效率精确仿真：在复合材料方面可以实现高效率、精确的仿真，可以得到每一层的特性，而不用自己逐层建模和仿真。

6）PCB/封装的可靠性仿真，利用 ACT 实现高效仿真：将原始 PCB 数据导进 ACT 工具进行修改，生成新的弹性流量，根据网格的特性快速得到电路板的特性，利用这样的一个工具可以准确、高效地完成仿真。

7）多物理场耦合仿真；

总体来说，ANSYS 16.0 拥有更强大的仿真能力、更大的规模、更复杂的实际能力、更快的速度、更便捷的协同设计，统一环境下可以实现多物理场的验证等。它有更好的稳健性，可以通过不同工况的仿真使用户设计的稳健性更加提升。

1.2 典型的 ANSYS 操作流程

ANSYS 软件是一个通用有限元软件，功能强大而复杂，解决问题广泛，可通过图形用户界面（GUI）和批处理（Batch）两种方式来实行操作。

交互图形用户界面方式可以方便地实现交互访问程序的各种功能、命令和帮助手册，一步一步地完成整个分析过程，使操作过程简单明了，适合初学者和简单工程问题的分析计算。

批处理方式是一种后台工作方式，批处理文件的编写是通过 ANSYS 软件自有的一种过程化语言——参数化设计语言，（ANSYS，Parametric Design Language，APDL）来实现的。批处理方式可以实现整个分析过程的一次性完成，大大提高了工作效率，并且 APDL 语言的编写程序易于修改和维护，对于相似问题通过源文件的少量修改即可重复使用，重现性好。

本节仅对图形用户界面的使用和操作进行简单的介绍，以便读者很快熟悉和掌握 ANSYS 的基本用法。对于 APDL 语言的使用，后文将作相应介绍。

1.2.1 ANSYS 的启动

ANSYS 软件版本很多，可应用于 PC 机、NT 工作站、UNIX 工作站，甚至巨型机的各类计算机及操作系统，数据文件在其所有的产品系列和工作平台上均兼容。

1．启动

执行“开始”→“程序”→ANSYS 16.0→Mechanical APDL Product Launcher 16.0 菜单命令，启动 ANSYS 软件，其界面如图 1-1 所示。在 Simulation Environment 下拉列表框中选择 ANSYS，在 License 下拉列表框中选择分析模块，本书中练习均选择 ANSYS Multiphysics。

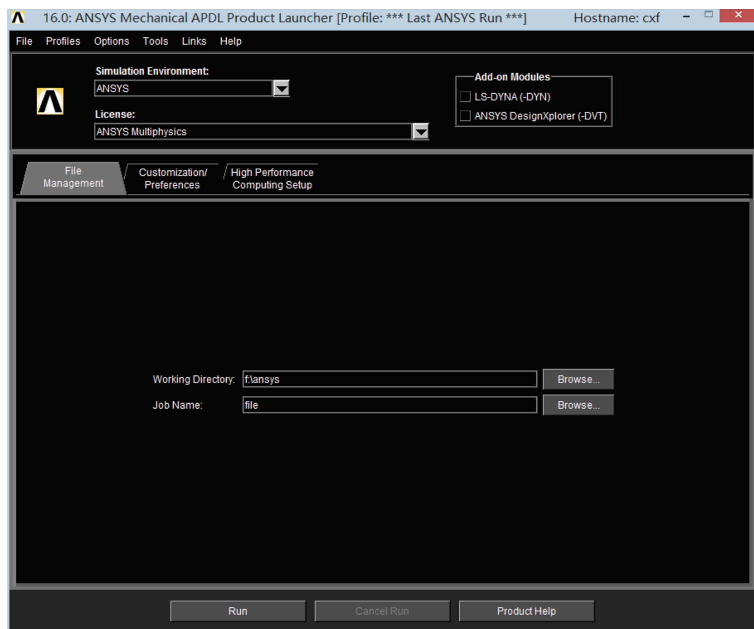


图 1-1 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 界面



2．设置工作目录

单击对话框中 Working Directory 文本框右侧的 Browse 按钮，选择自己的工作目录。此目录一旦选定后，除非在运行过程中更改，ANSYS 程序所生成的文件都将自动写在此目录下。

3．设置工作文件名

在 Job Name 文本框中设置初始文件名，默认为上次运行定义的文件名，第一次运行 ANSYS 程序时默认文件名为 file。在不同的工程分析时，应尽量使用不同且能体现文件作用的文件名。

4．运行

以上参数设置完成之后即完成了基本设置，用户就可以单击 Run 按钮运行 ANSYS 了。除 File Management 选项卡外，Customization Preferences 选项卡用于工作空间和数据库大小的设置，High Performance Computing Setup 选项卡用于并行计算等的设置。默认设置即可满足大多初学者的需求，无须做任何改动。

1.2.2 ANSYS 用户界面介绍

在启动 ANSYS 之后，用户可以看到 ANSYS 用户界面，该界面上主要包含七个部分，如图 1-2 所示。



图 1-2 ANSYS 用户界面

1．应用菜单（**Utility Menu**）

应用菜单包括文件管理、选择、列表、显示控制、坐标控制、参数设置等应用功能。该

菜单为下拉式结构，可直接完成某一功能或弹出对话框，其主要功能见表 1-1。

表 1-1 ANSYS 应用菜单功能介绍

菜　　单	功　　能
File	进行文件控制、数据库存储和恢复、文件导入导出、文件格式转换等操作
Select	程序运行过程中对实体或有限元目标进行选择
List	将模型属性、载荷和结果等用文本形式显示
Plot	控制显示模型，通常用于建模过程中对各种元素的选取
PlotCtrls	控制视图显示，如缩放、模型属性显示方式、载荷显示等
WorkPlane	对坐标系的控制，包括建立、设置、删除和变换，是建立复杂模型常用的工具
Parameters	对变量的控制，包括模型参数和结果参数变量
Macro	定义、执行宏命令
MenuCtrls	控制 ANSYS Toolbar 的形式
Help	ANSYS 联机帮助手册，在交互操作中很多对话框中都有 Help 按钮，可以随时单击查看

2．主菜单（Main Menu）

该菜单为 ANSYS 的主要功能菜单，主要分为前处理、求解和后处理等。

3．图形窗口（Graphics NPLO）

图形窗口显示由 ANSYS 创建或传递到 ANSYS 的模型以及分析结果等图形信息。

4．显示控制

显示控制窗口中的工具用于控制图形窗口中模型的显示信息，可以定量调节模型的显示角度，放大或缩小模型，以及移动图形。

5．输入窗口（Input）

该窗口为 ANSYS 命令区域，可以显示程序的提示信息和浏览先前输入的命令，可以显示本次运行中输入的所有命令。除输入单条命令外，也可以大段输入 APDL 命令。

6．工具条（Toolbar）

用户可以将常用命令制成工具条，方便使用。工具条中默认包括存储 DB 文件（SAVE_DB）、恢复 DB 文件（RESUME_DB）、退出（QUIT）和图形显示控制（POWEGRPH）4 类工具。

7．状态栏（Status Bar）

状态栏中从左至右依次显示：提示操作信息、材料类型、单元类型、实常数类型、坐标系和工作区域。

除以上描述的区域外，在 ANSYS 操作过程中还会弹出对话框。此类对话框是在程序运行过程中为完成操作或设置参数弹出的，起提示用户为完成特定功能输入数据等作用。

1.2.3 ANSYS 操作流程

ANSYS 软件具有多种有限元分析能力，从简单的线性分析到复杂的非线性动态分析，



但主要分析过程归纳起来可分为以下 3 个步骤。

- 创建有限元模型：包括创建或读入几何模型、定义材料属性和划分网格生成单元节点。
- 施加载荷并进行求解：包括施加载荷、边界条件和进行求解计算。
- 后处理查看分析结果：对结果进行分析检验。

ANSYS 分析的这 3 个步骤可以在主菜单（Main Menu）中得到明显体现，以下将做详细介绍。

1．建立有限元模型（Preprocessor）

在 ANSYS 分析过程中，有限元模型的建立需要花费整个分析过程 70%的时间和精力，主要由以下几个部分组成。

（1）指定工作名和分析标题

1）定义工作名。

工作名用来识别 ANSYS 作业，当为某工程定义了工作名，它就成为分析过程中所产生的所有文件的文件名，相应扩展名用来标识不同分析数据文件。为每一次分析给定文件名，可以确保文件不被覆盖。若用户没有给定作业名，所有文件名将默认为 file。工作名的更改方式如下。

Command：/FILENAME

GUI：Utility Menu→File→Change Job Name

2）定义分析标题。

分析标题定义之后，ANSYS 系统将在所有的图形显示和求解输出中包含此标题，其定义方式如下。

Command：/TITLE

GUI：Utility Menu→File→Change Title

3）定义单位制。

ANSYS 中没有定义系统的单位制体系，用户可以使用任意一种单位制，只要保证输入的数据使用的是同一单位制里的单位即可。而/UNITS 命令可以标识正在使用的单位制，但不能在不同单位制之间进行转换。

（2）定义单元类型

ANSYS 提供了近 300 种单元类型，每一种单元类型都有自己的特定编号和单元名，如 SOLID70、PLANE55 等，分别用于不同的物理场分析。具体单元类型将在第 2 章详细介绍。

（3）定义单元实常数

当单元类型选定之后，应该输入与此单元类型相关的单元实常数。单元类型的实常数是根据所选的单元类型确定的。

（4）定义材料属性

大多数单元类型在分析时都要指定材料属性，如材料的电阻率、导热系数、弹性模量、泊松比等。

（5）创建模型

根据实际情况创建所需要的几何模型，并进行网格划分生成有限元模型，或者直接创建

有限元模型。

2．加载和求解（Solution）

在模型建立之后，需要定义分析类型和分析选项，施加载荷，输出控制等。用户可以通过 Preprocessor 处理器中的 Loads 项完成，也可以通过 Solution 处理器来完成，并对有限元模型进行初始化和求解。

（1）定义分析类型和分析选项

根据问题确定分析类型，ANSYS 中可以进行的分析类型包括稳态、瞬态和子结构分析等。

（2）施加载荷

ANSYS 程序会根据分析问题的不同显示不同的载荷加载，主要包括自由度约束、表面载荷、体载荷等。这些载荷大多都可以施加到实体模型上，包括点、线、面和体等；也可以直接加载到有限元模型上，包括节点和单元。无论是以哪种方式施加的载荷，最终均会转换到有限元模型上。关于载荷的施加，将在第 6 章详细介绍。

（3）求解

获得有限元模型及载荷信息并进行求解计算，将结果数据写入结果文件（对于热分析 Jobname.RST）和数据库文件中。数据库文件中每一次只驻留一组结果，而结果文件中将储存所有的结果数据。

3．结果处理（General Postproc&TimeHistPostproc）

当计算完成后，用户可以通过 ANSYS 后处理器来查看计算结果。在 ANSYS 中，有两个后处理器：POST1 和 POST26。POST1 为通用后处理器（General Postproc），用于查看模型在某一时间步的计算结果；POST26 为时间-历程后处理器（TimeHist Postproc），用于查看模型的特定点在所有时间步内的计算结果变化。关于这两个后处理器的使用将在第 8 章详细介绍。

1.3 ANSYS 分析案例详解

下面将通过一个简单的分析案例，使读者对 ANSYS 16.0 有一个初步了解，对 ANSYS 各个模块和菜单在使用过程中的功能和使用方法有个直观的印象。读者在学习时无须了解操作步骤的每一项内容，这些内容在后面的章节中将有详细地介绍，仅需要按照操作步骤学习，了解 ANSYS 有限元分析的基本流程即可。

1.3.1 问题描述

一根电线半径 r=9.525 mm，因欧姆效应产热率为 1200 kW/m^3，电线的导热系数 k=6.94 W/(m・℃)，电线裸露在 21℃的空气中，外表面与空气的对流换热系数 a=8.76 W/(m^2・℃)。电线的几何模型如图 1-3 所示，可以简化为轴对称平面分析问题，取轴线长度 10 mm 进行分析，简化后的计算几何模型如图 1-4 所示。确定电线的表面温度以及中心线处的温度值，并求解散热量。



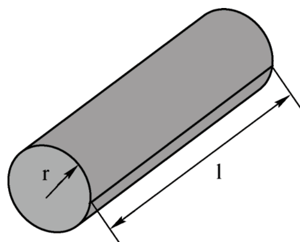


图 1-3　电线几何模型

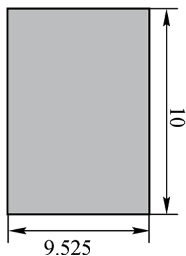


图 1-4　简化后的计算几何模型

1.3.2 问题分析

选用平面热分析 PLANE55 单元进行简化模型的有限元分析。将电线因欧姆效应产生的热生产率以热生成体载荷的方式施加到电线上。分析时，温度采用℃，其他单元采用国际单位制。

1.3.3 GUI 操作步骤

（1）定义分析文件名。执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise1”，如图 1-5 所示，单击 OK 按钮。

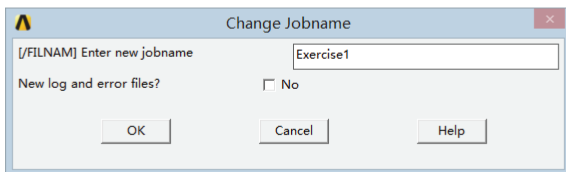


图 1-5　Change Jobname 对话框

（2）定义单元类型。执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，弹出 Element Types 对话框，如图 1-6 所示，单击 Add 按钮，弹出图 1-7 所示的 Library of Element Types 对话框。

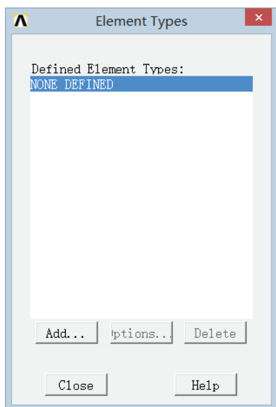


图 1-6　Element Types 对话框

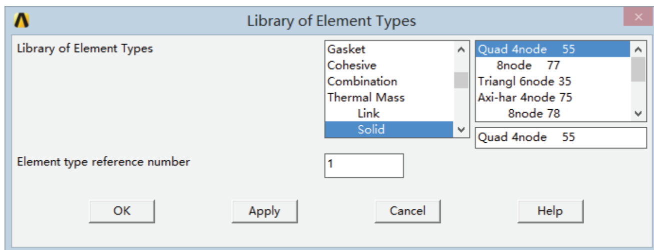


图 1-7　Library of Element Types 对话框

在单元库中选中 Plane55 单元，即先选中 Thermal Mass 中的 Solid 单元，再在右侧选择 Quad 4node 55 单元。确定选取正确后，单击 OK 按钮。

在图 1-6 所示的 Element Types 对话框中，选中 Type 1，单击 Options 按钮，弹出图 1-8 所示的 PLANE55 element type options 对话框，K3 项选择 Axisymmetric，单击 OK 按钮，在 Element Types 对话框中单击 Close 按钮。

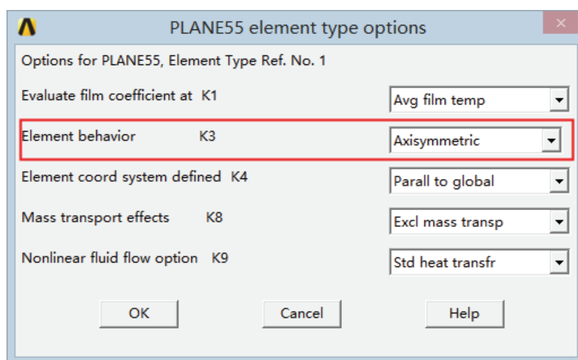


图 1-8 PLANE55 element type-options 对话框

（3）定义参数。在命令窗口输入以下参数定义：

R=9.525E-3

L=10E-3

Q=1200000

T0=21

AP=8.76

（4）定义材料属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，弹出图 1-9 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。

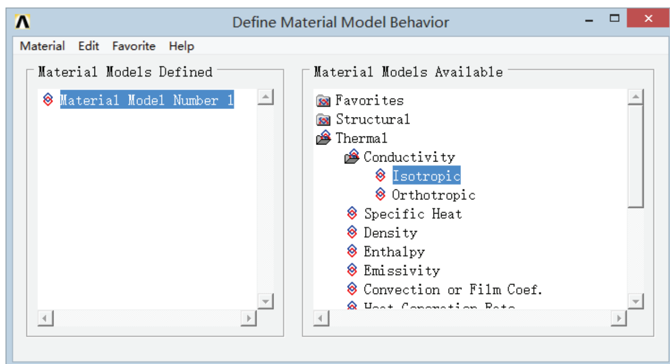


图 1-9 Define Material Model Behavior 对话框

在左侧窗口中选择材料模型号，右侧窗口为材料属性定义，对于 Material Model Number 1，依次选择 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic，弹出 Conductivity for Material Number 1 对话框，如图 1-10 所示。在 KXX 文本框中输入

“6.94”，单击 OK 按钮。

（5）建立几何模型。直接建立矩形，执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions 菜单命令，弹出图 1-11 所示的对话框，在 X1、X2、Y1、Y2 中分别输入 0、R、0、L，单击 OK 按钮，建立矩形，如图 1-12 所示。

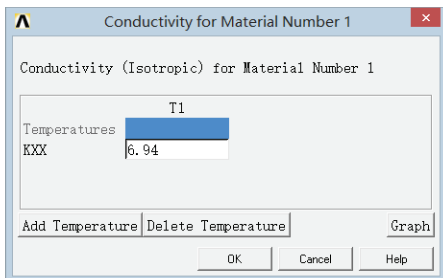


图 1-10　Conductivity for Material Number 1 对话框

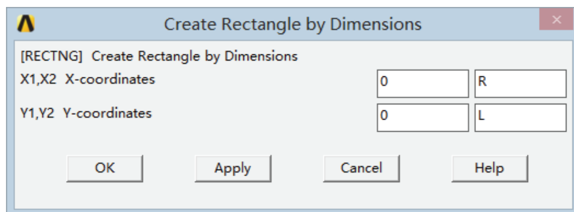


图 1-11　Create Rectangle by Dimensions 对话框

（6）赋予模型材料和单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→All Areas 菜单命令，弹出图 1-13 所示的 Area Attributes 对话框，MAT 项默认材料属性号为 1，TYPE 项默认单元类型号为 1，单击 OK 按钮，完成电线模型属性的设置。



图 1-12　几何模型图

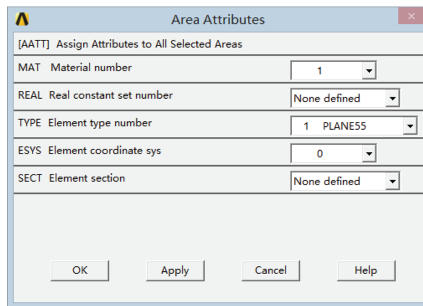


图 1-13　Area Attributes 对话框

（7）设置单元密度。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，弹出图 1-14 所示的 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 0.001，单击 OK 按钮。

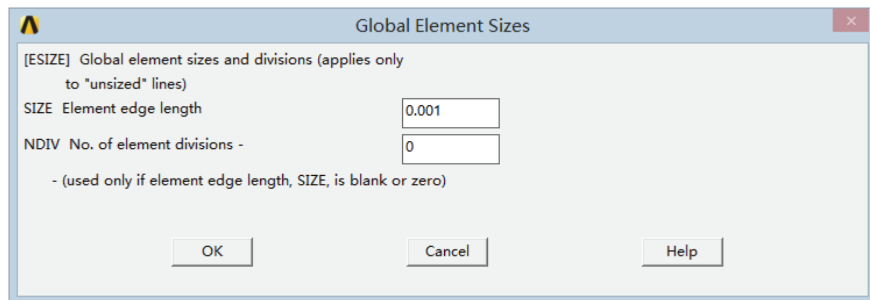


图 1-14　Global Element Sizes 对话框

（8）划分单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Target Surf 菜单命令，选择 Pick All，生成的有限元模型如图 1-15 所示。

（9）施加边界条件。

1）施加热生产载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Heat Generate→On Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取矩形模型，单击 OK 按钮，弹出图 1-16 所示的 Apply HGEN on areas 对话框，VALUE 项设为 Q，单击 OK 按钮。

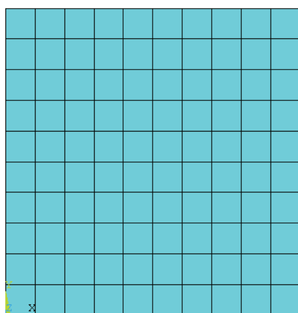


图 1-15　有限元模型图

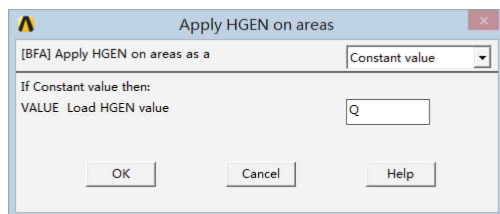


图 1-16　Apply HGEN on areas 对话框

2）设置电线外表面对流换热。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，拾取矩形右侧的 2 号线，如图 1-17 所示。单击 OK 按钮，弹出图 1-18 所示的 Apply CONV on lines 对话框，将 VALI 项设为 AP，VAL2I 项设为 T0，单击 OK 按钮。

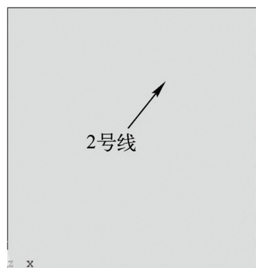


图 1-17　温度边界拾取示意图

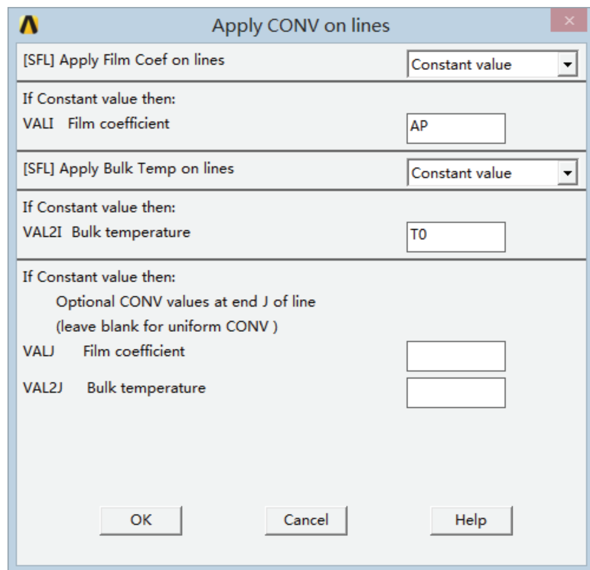


图 1-18　Apply CONV on lines 对话框

（10）设置求解选项。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出图 1-19 所示的 New Analysis 对话框，选中 Steady-State 单选按钮，单击 OK 按钮。

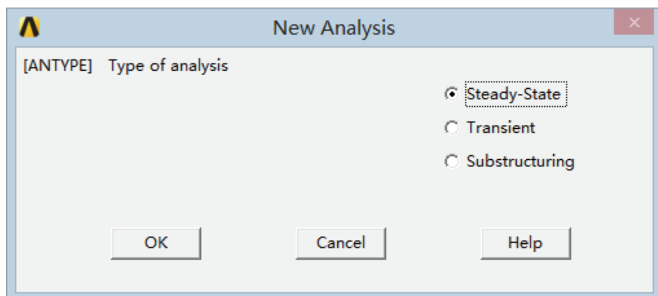


图 1-19 New Analysis 对话框

（11）设置温度偏移。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Temperature Units 菜单命令，弹出图 1-20 所示的 Specify Temperature Units 对话框，TOFFST 项设为 Celsius，单击 OK 按钮。

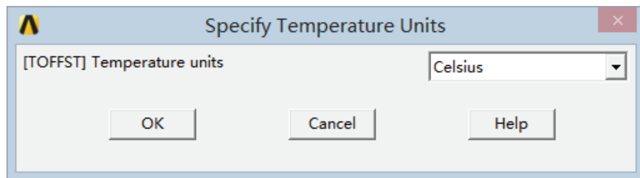


图 1-20 Specify Temperature Units 对话框

（12）输出控制。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 菜单命令，弹出图 1-21 所示的 Solution Controls 对话框，Time at end of loadstep 项设为 1，其他项保留默认设置，单击 OK 按钮。

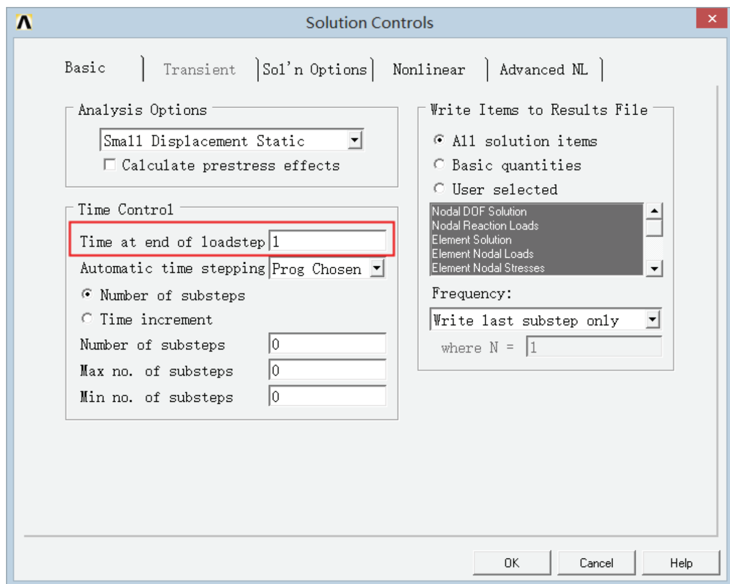


图 1-21 Solution Controls 对话框

（13）存盘。执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS Toolbar 中的 Save_DB 按钮。

（14）求解。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 STATUS Command 和 Solve Current Load Step 对话框，如图 1-22 和图 1-23 所示。审核 STATUS Command 文件中的模型信息，确定正确后，单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮，程序开始进行计算。

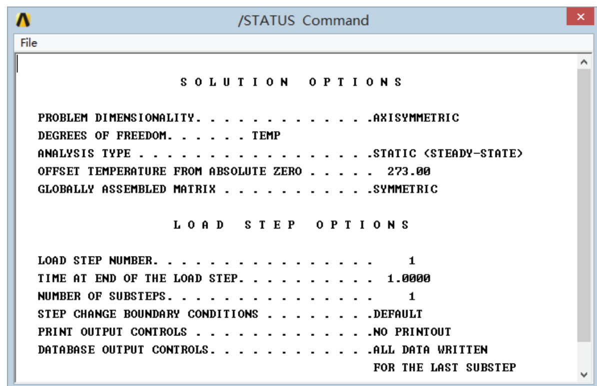


图 1-22　STATUS Command 对话框

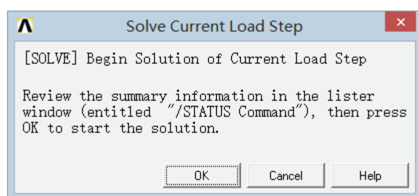


图 1-23　Solve Current Load Step 对话框

计算完成后，程序弹出图 1-24 所示的信息框，提示计算完成。单击 Close 按钮关闭计算窗口，并进行存盘。

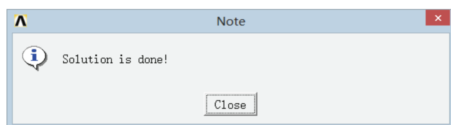


图 1-24　Note 对话框

（15）显示沿径向的温度分布图。执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

1）定义径向路径。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，拾取图 1-25 所示模型上 Y=0 的所有节点，单击 OK 按钮，弹出图 1-26 所示的 By Nodes 对话框，在 Name 项输入 R1，其他取默认值，单击 OK 按钮，弹出图 1-27 所示的 PATH Command 列表窗口，显示路径 R1，节点数为 11。

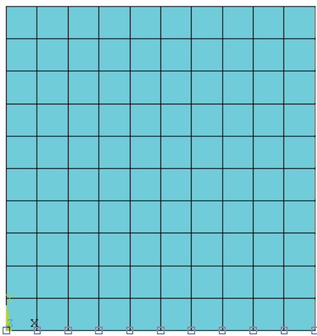


图 1-25　沿径向路径拾取的节点

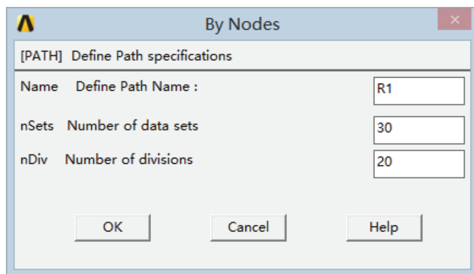


图 1-26　By Nodes 对话框



注意：在拾取节点的过程中，一定要按照一定的顺序从左至右依次拾取。

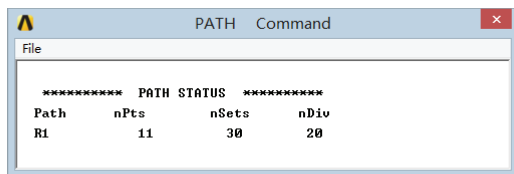


图 1-27　PATH Command 列表窗口

2）将温度场分析结果映射到径向路径上。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path 菜单命令，弹出图 1-28 所示的 Map Result Items onto Path 对话框，Lab 项设为映射标签 TR1，在 Item，Comp Item to be mapped 列表框中选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，单击 OK 按钮，完成温度值到路径 R1 的映射。

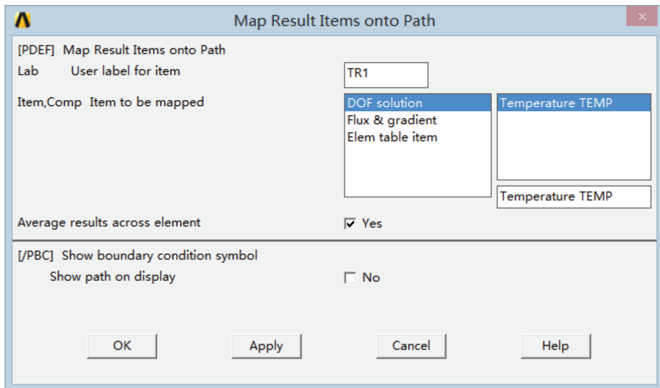


图 1-28　Map Result Items onto Path 对话框

3）显示沿路径温度分布曲线。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Graph 菜单命令，弹出图 1-29 所示的 Plot of Path Items on Graph 对话框，在 Lab1-6 Path items to be graphed 列表框中选择 TR1，单击 OK 按钮，得到图 1-30 所示的沿路径 R1 的温度分布曲线。

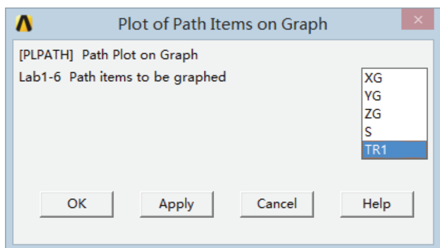


图 1-29　Plot of Path Items on Graph 对话框图

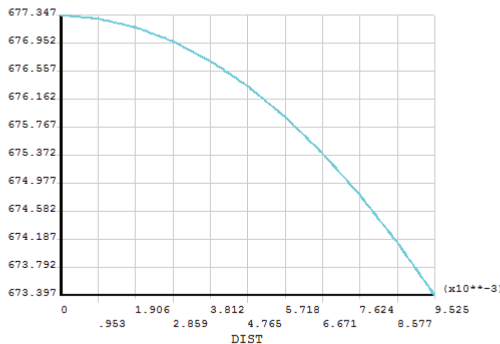


图 1-30　沿路径 R1 温度分布曲线变化图

4）显示沿径向的温度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Geometry 菜单命令，弹出图 1-31 所示的 Plot of Path Items on Geometry 对话框，在 Item Path items to be displayed 列表框中选择 TR1，其他项保留默认设置，单击 OK 按钮，温度沿径向的温度分布云图如图 1-32 所示。

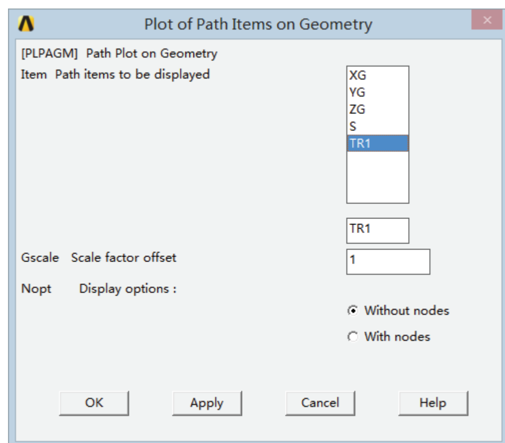


图 1-31 Plot of Path Items on Geometry 对话框

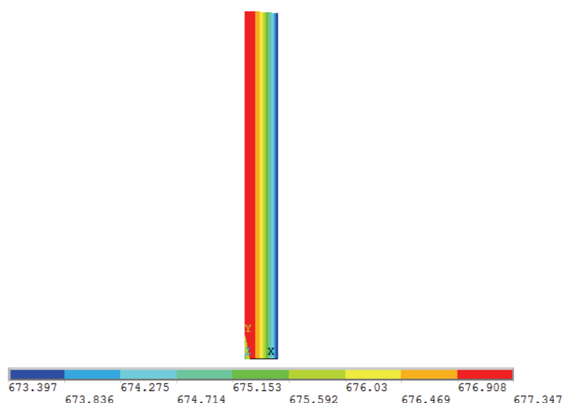


图 1-32 沿径向的温度分布云图

（16）显示温度分布云图。

1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出图 1-33 所示的 Window Options 对话框，INFO 项设为 Legend ON，单击 OK 按钮。

2）执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出图 1-34 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择 Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布云图如图 1-35 所示。

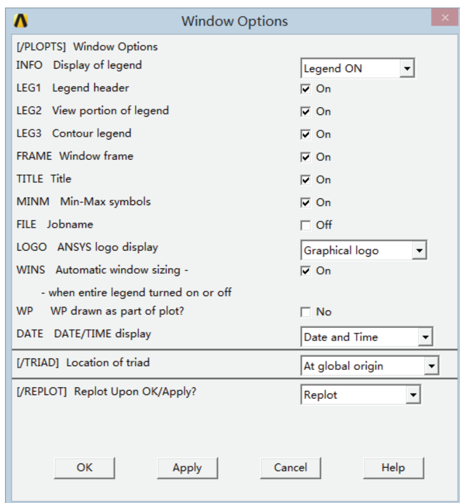


图 1-33 Window Options 对话框

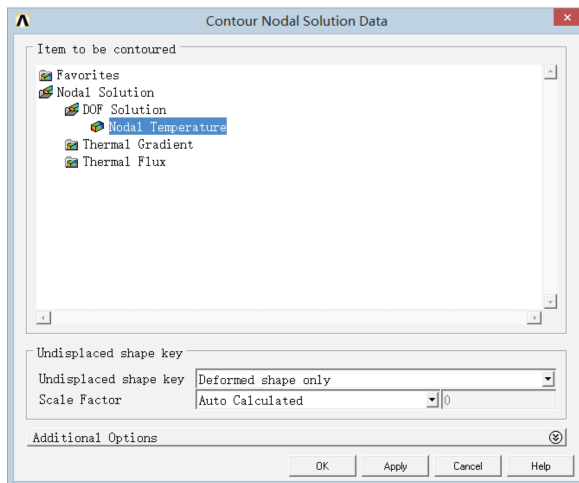


图 1-34 Contour Nodal Solution Data 对话框

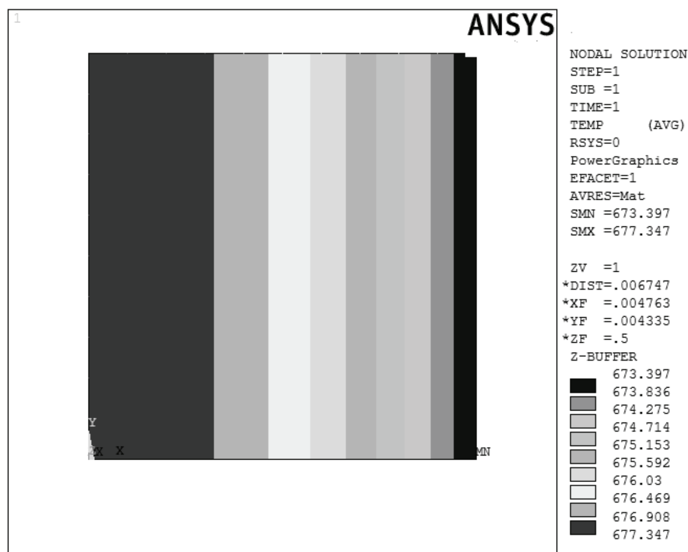


图 1-35　电线的温度分布云图

3）将二维计算结果扩展至三维。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Symmetry Expansion→2D Axi-Symmetric 菜单命令，弹出图 1-36 所示的 2D Axi-Symmetric Expansion 对话框。

在 Select expansion amount 选项组中选择 3/4 expansion 单选按钮，单击 OK 按钮，得到扩展的温度分布云图如图 1-37 所示。

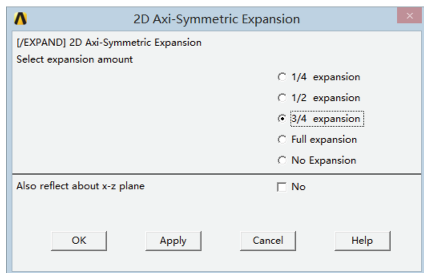


图 1-36　2D Axi-Symmetric Expansion 对话框

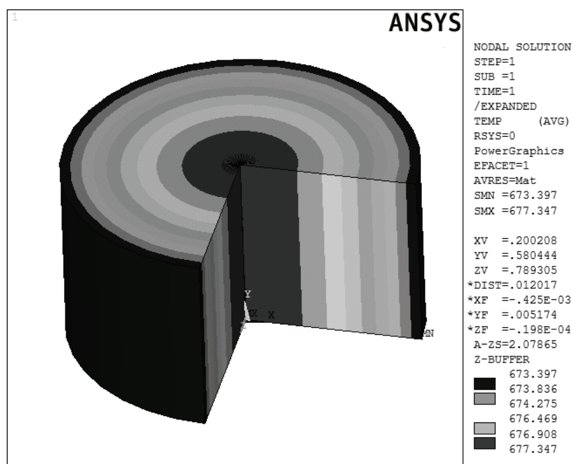


图 1-37　电线的三维扩展温度分布云图

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Symmetry Expansion→2D Axi-Symmetric 菜单命令，在 2D Axi-Symmetric Expansion 对话框中的 Select expansion amount 选项组中选择 No Expansion 单选按钮，单击 OK 按钮，取消扩展。

（17）退出 ANSYS。单击 ANSYS Toolbar 中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话

框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

1.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME, Exercise1
/PREP7
R=9.525E-3
L=10E-3
Q=1200000
T0=21
AP=8.76                         !定义参数
ET,1,PLANE55                    !定义单元类型
KEYOPT,1,3,1                    !设置为轴对称分析
MP,KXX,1,6.94                   !定义电线的热传导系数
RECTNG,0,R,0,L,                 !建立矩形
AATT,1,,1                       !设置单元属性
ESIZE,0.001,0,                  !定义单元划分尺寸
MSHKEY,2                        !设置映射单元划分选项
AMESH,1                         !划分单元
BFA,1,HGEN,Q                    !施加热生成载荷
SFL,2,CONV,AP, ,T0,             !在 2 号线施加对流换热边载荷
FINISH
/SOLU                           !进入求解器
ANTYPE,STATIC                   !设置为稳态求解
TOFFST,273,                     !设置温度偏移
TIME,1                          !定义求解时间
SOLVE                           !求解
FINISH
/POST1                          !进入后处理器
SET,LAST                        !读入最后子步结果
/POST1
SET,LAST
FLST,2,11,1
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,8
FITEM,2,9
FITEM,2,10
FITEM,2,11
FITEM,2,2
!*
```

```
PATH,R1,11,30,20,
PPATH,P51X,1
PATH,STAT
!*
PDEF,TR1,TEMP, ,AVG                    !向所定义路径映射温度分析结果
PLPATH,TR1                             !显示沿路径温度变化的曲线图
PLPAGM,TR1,1,Blank                     !在几何模型上显示径向温度分布云图
PLPAGM,TEMP,,0,                        !显示温度分布云图
/EXPAND,27,AXIS,,,10                   !设置三维周期扩展选项
PLPAGM,TEMP,,0,                        !显示温度分布云图
*GET,T22,NODE,22,TEMP,                 !提取电线中心线 22 号节点温度
*GET,T12,NODE,12,TEMP,                 !提取电线表面 12 号节点温度
Tf=T22-T12                             !有限元计算结果
LT=(R**2)*Q/(4*6.94)                   !理论计算结果
ER=1-Tf/LT                             !计算误差
*STAT                                  !列表所有参数
FINISH
/EXIT,NOSAV
```

第 2 章　单元和材料属性



对于不同的物理场问题分析，在 ANSYS 中需要选取相应的单元类型，定义不同的材料属性。本章主要对 ANSYS 提供的单元类型和材料特性以及它们的定义方法进行详细说明。

学习目标：

（1）了解 ANSYS 单元类型，掌握单元定义方式;

（2）掌握单元材料特性的定义方式;

2.1　单元类型

有限单元法，是一种有效解决数学问题的解题方法。其基础是变分原理和加权余量法，其基本求解思想是把计算域划分为有限个互不重叠的单元，在每个单元内选择一些合适的节点作为求解函数的插值点，将微分方程中的变量改写成由各变量或其导数的节点值与所选用的插值函数组成的线性表达式，借助于变分原理或加权余量法，将微分方程离散求解。

在每个单元内选择基函数，用单元基函数的线性组合来逼近单元中的真解，整个计算域上总体的基函数可以看成由每个单元基函数组成的，则整个计算域内的解可以看作是由所有单元上的近似解构成的。

在计算机中进行有限单元法计算时，第一步就是要建立有限元模型。在 ANSYS 平台上，可以通过先建立实体模型然后进行网格划分来实现或者直接建立单元。

ANSYS 16.0 提供了近 300 种单元类型，单元名分为两部分——字符和数字。其中，字符表征了单元的属性，是一维、二维还是三维，是结构单元还是接触单元等；数字就是这个单元的代号，在版本升级过程中不断更新。根据分析问题的不同，选取相应的单元类型。ANSYS 提供的单元类型主要包括应力场分析、显式动力学分析、热场分析、流场分析、电磁场分析、接触分析，耦合分析、声学分析和扩散分析等，表 2-1 所示为部分单元类型，更详细的单元信息可以查看 ANSYS HELP VIEWER。

表 2-1　ANSYS 部分单元类型列表

分 析 类 型	单　　元
应力场分析	SOLID185, SOLID186, SOLID187, SOLID285, SOLID65; PLANE182, PLANE183, PLANE25, PLANE83; SOLID272, SOLID273; SOLSH190; SHELL181, SHELL281, SHELL28, SHELL41; SHELL208, SHELL209, SHELL61; SOLID185, SOLID186, SOLSH190;

（续）

分 析 类 型	单　　元
应力场分析	BEAM188, BEAM189; PIPE288, PIPE289, ELBOW290; LINK180, LINK11; MASS21; INTER194, INTER195, INTER204, INTER205; INTER192, INTER193, INTER202, INTER203
显式动力学分析	SOLID164, SOLID168; PLANE162; SHELL163; BEAM161; LINK160, LINK167, COMBI165; MAS166
热场分析	SOLID278, SOLID279, SOLID70, SOLID87, SOLID90; PLANE35, PLANE55, PLANE75, PLANE77, PLANE78; SOLID278, SOLID279; SHELL131, SHELL132; LINK31, LINK33, LINK34; MASS71
流场分析	HSFLD242; HSFLD241; FLUID38, FLUID136, FLUID138, FLUID139, FLUID116; FLUID116
电磁场分析	SOLID96, SOLID97, SOLID122, SOLID123, SOLID231, SOLID232, SOLID236, SOLID237; PLANE53, PLANE121, PLANE230, PLANE233
耦合分析	SOLID226, SOLID227, SOLID5, LINK68, SOLID98, CTP215, CPT216, CPT217, ROM144; PLANE223, PLANE13, CPT212, CPT213
接触分析	TARGE170, CONTA173, CONTA174, CONTA176, CONTA177, CONTA178; CONTA175 TARGE169, CONTA171, CONTA172

2.2　单元定义方法

在 ANSYS 分析中，一般在建立模型之前根据实际分析问题定义合适的单元类型，至少在划分网格或建立有限元模型之前完成单元类型的定义。

在 ANSYS 16.0 的图形界面下，在前处理器 PREP7 中定义单元类型的步骤如下。

（1）执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，出现图 2-1 所示的前处理器，单击 Add/Edit/Delete 项，打开图 2-2 所示的 Element Types 对话框。

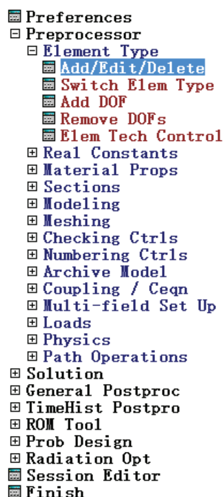


图 2-1　前处理器

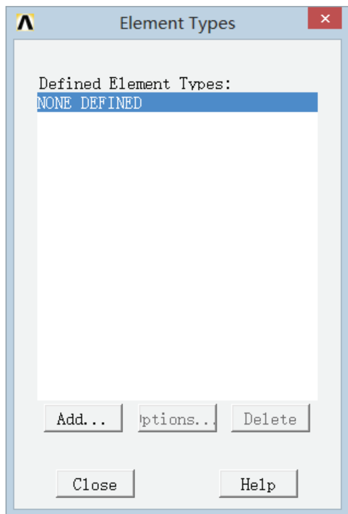


图 2-2　Element Types 对话框

（2）单击 Add 按钮，添加单元，弹出图 2-3 所示的 Library of Element Types 对话框，选择要添加的单元类型。

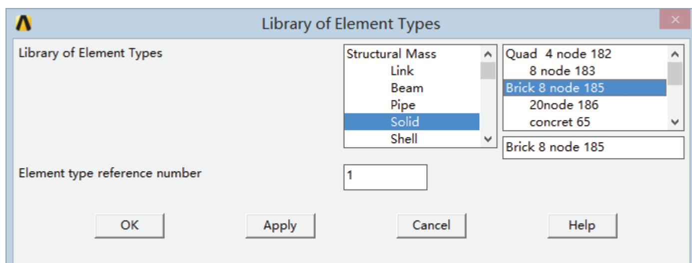


图 2-3　Library of Element Types 对话框

（3）在左侧列表框中选中 Solid（结构-体），并在右侧列表框中找到需要的单元类型，如 Brick 8 node 185 等。

（4）选中单元后，单击 OK 按钮完成该单元类型的定义，并根据需要定义其他单元类型。

除以 GUI 方式实现之外，用户还可以直接用 ANSYS 自带的参数化编程语言（APDL）来定义单元类型，当确定要定义的单元类型后，直接在命令窗口输入，如：

```
ET,1,SOLID69
ET,2,PLANE77
```

即用两个命令分别定义了 SOLID69 和 PLANE77 两种单元类型，并分配了相应的参数编号 1 和 2，其中 ET 为 Element Type 的首字母。以上关于单元类型的定义也可以省略 SOLID 和 PLANE，直接用单元编号，如下：

```
ET,1,69
ET,2,77
```

提示：同样，也可以省略参数编号 1 和 2，则单元按照已存在的单元按顺序给定单元编号，建议保留该项。关于 ET 命令的具体介绍，可参看 ANSYS 帮助文件。

定义好一个单元类型后，如果需要，在 Element Types 中单击 Options 对单元做进一步的定义，如图 2-4 所示的 SOLID5 element type options 对话框，对单元 SOLID5 做进一步的定义。在 Element degree(s) of freedom K1 下拉列表框中选中 TEMP 做温度分析，单击 OK 按钮完成再定义。

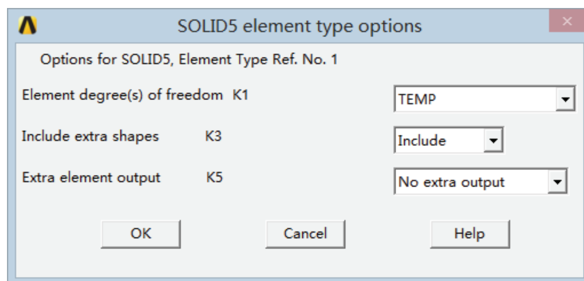


图 2-4　SOLID5 element type options 对话框

（5）若单元定义错误，需要删除该单元类型，只需在图 2-2 所示的 Element Types 对话框中选中需要删除的单元，单击 Delete 按钮即可。

2.3 定义材料属性

绝大多数单元类型都需要材料特性，根据应用的不同，材料特性又分为线性材料或者非线性材料，各向同性材料或者各向异性材料，是温度的函数或与温度无关等。

每一种材料都有一个材料参考号，作为独有的 ID。在一些分析中，模型可能需要多种材料才能精确表达实体要求或对应模型中的几种材料。

2.3.1 材料属性

根据分析问题的不同，所涉及的材料属性也不尽相同，主要包括以下几个方面。

（1）力学性能：包括弹性模型、泊松比、切变模量、热膨胀系数和密度等。

（2）热场性能：包括导热系数、密度、比热容和晗值等。

（3）电磁性能：包括电阻率、介电常数、透磁率和损耗角等。

（4）还可以定义随温度变化的边界条件。

2.3.2 材料属性定义命令

在 ANSYS 16.0 的图形界面下，在前处理器 PREP7 中定义材料属性的步骤如下。

（1）执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Materials Models 菜单命令，弹出图 2-5 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。

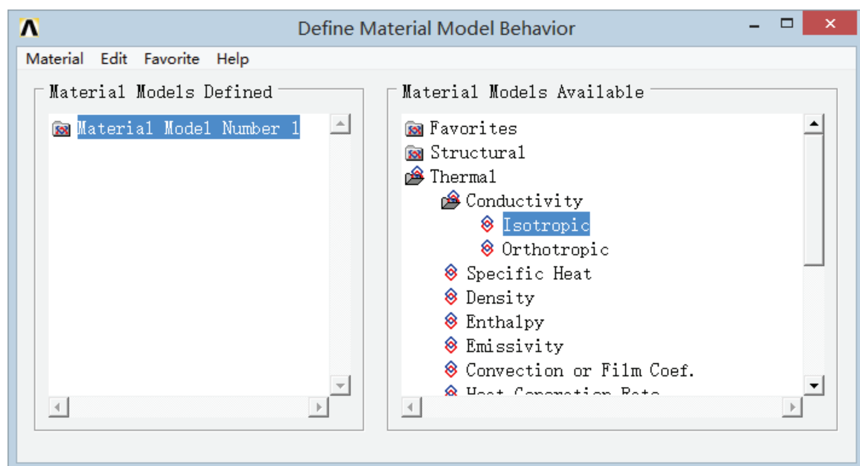


图 2-5　Define Material Model Behavior 对话框

（2）在左侧窗口中默认有 1 号材料，选中，在右侧窗口中单击结构、热场或者电磁等项展开目录，选择要定义的材料属性，这里展开 Thermal 项，选中 Conductivity。

（3）单击 Conductivity 展开该项，对于一般各向同性材料单击 Isotropic，打开图 2-6 所示的 Conductivity for Material Number 1 对话框。

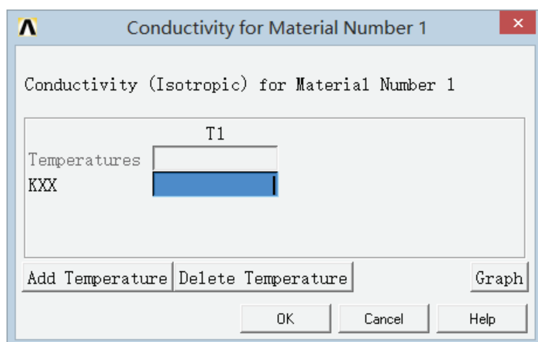


图 2-6　Conductivity for Material Number 1 对话框

1）若导热系数与温度无关，则直接输入参数值。

2）若导热系数随温度变化，则单击 Add Temperature 按钮添加温度项，Temperatures 项输入温度值，KXX 项输入相应导热系数值。图 2-7 所示为某铜材料随温度变化的导热系数定义，单击 Graph 按钮绘制该材料导热系数与温度的关系图，如图 2-8 所示。

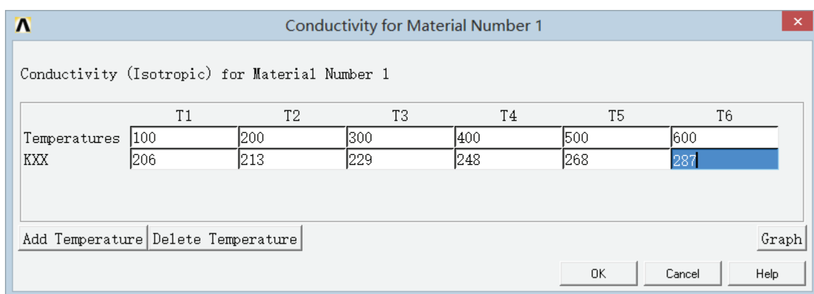


图 2-7　某黄铜随温度变化的导热系数定义

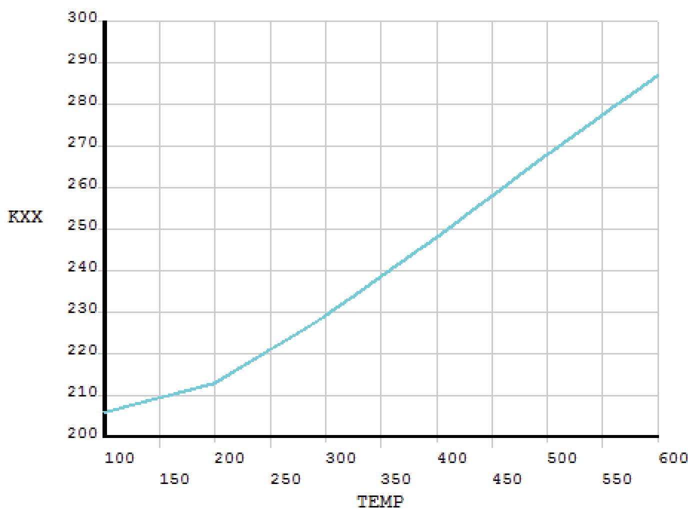


图 2-8　导热系数与温度的关系图

单击 OK 按钮，完成各向同性导热系数的定义。

（4）如果材料为各向异性材料，即材料各方向导热系数不同，则在图 2-5 所示的 Define Material Model Behavior 对话框右侧窗口中展开 Conductivity→Orthotropic 项，进行各向异性导热系数定义操作，如图 2-9 所示。

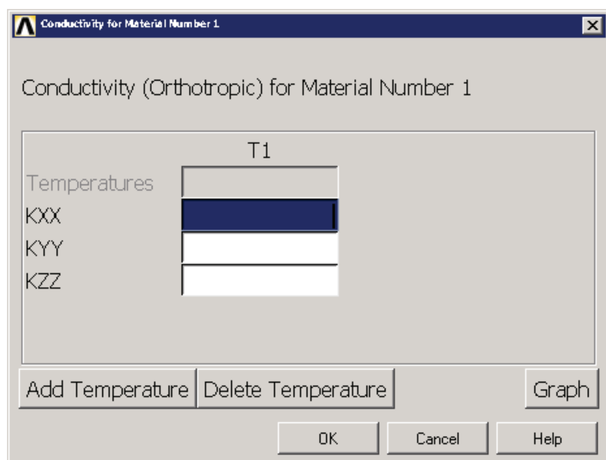


图 2-9　各向异性导热系数定义

分别在 KXX、KYY、KZZ 文本框中输入 X 方向、Y 方向和 Z 方向的导热系数值。若随温度变化，则单击 Add Temperature 添加温度项。单击 OK 按钮完成各向异性导热系数的定义。

（5）其他材料属性，如比热容（Specific Heat）、密度（Density）、电阻率、弹性模量、线膨胀系数等均采用同样的方式进行定义。

（6）完成 1 号材料的定义之后，若须添加其他材料属性，则在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，输入材料号，单击 OK 按钮完成新材料的创建。选中新材料，并在右侧窗口中继续为该材料定义属性。

提示：除以 GUI 方式实现之外，用户还可以直接用 ANSYS 自带的 APDL 语言来完成以上操作，如“MP, DENSE, 8, 10”命令就定义了编号为 8 的材料的密度为 10。

```
MPTEMP, 1, 200, 420, 650,
MPDAT, KXX, 5, 1, 0.34, 0.39, 0.43
```

定义了编号为 5 的材料随温度变化的导热系数。

（7）若要删除某编号材料属性，在图 2-5 所示的 Define Material Model Behavior 对话框中选中要删除的材料属性，执行 Edite→Delete 菜单命令，即可完成材料属性的删除。

提示：ANSYS 软件还可以直接从其他文件中读取材料参数，进行材料参数的复制等，限于篇幅，这里不再详细介绍。

2.4 本章小结



有限单元是 ANSYS 有限元法分析的基础，本章对 ANSYS 16.0 所支持的单元类型进行了简单的分类总结，主要讲解了使用 GUI 方式进行单元类型的定义方式以及各种材料属性的定义方式。

第 3 章　坐标系和工作平面

ANSYS 有限元建模和分析过程中，坐标系的选择和工作平面的使用必不可少。ANSYS 提供了多种坐标系和工作平面，它们的灵活运用给建模和问题分析带来很大的便利。本章将针对坐标系和工作平面的使用进行详细说明。

学习目标：

（1）了解坐标系的分类和使用方法;

（2）了解工作平面的定义和使用方法。

3.1　坐标系简介

在 ANSYS 分析过程中，坐标系的灵活运用给分析过程带来极大的便利。在进行实体建模过程的讲解之前，先对坐标系的使用作简单的介绍。在不同的分析阶段，ANSYS 使用了多种坐标系，每种坐标系的定义和作用不同，主要包括以下几种。

（1）总体坐标系和局部坐标系：用来确定几何形状参数的空间位置。

（2）显示坐标系：用于几何形状参数的列表和显示。

（3）节点坐标系：定义每个节点的自由度和节点结果数据的方向。

（4）单元坐标系：确定材料特性主轴和单元结果数据的方向。

（5）结果坐标系：用来列表、显示节点和单元结果。

3.1.1 总体坐标系和局部坐标系

总体坐标系和局部坐标系（Global and Local Coordinate Systems）是用来定位几何体的。在默认情况下，建模操作时使用的坐标系是总体笛卡儿坐标系。但是在很多情况下，采用其他形式的坐标表达形式会更方便。

1. 总体坐标系

总体坐标系是一个绝对的参考系。ANSYS 中提供了 4 种坐标表达式：笛卡儿坐标、Z 轴柱坐标系、球坐标系和 Y 轴柱坐标系。这些坐标系都是右手法则，具有相同的原点，它们由其参考号识别，分别如图 3-1 所示。

ANSYS 引用坐标值总是采用固定的方式：X 轴、Y 轴和 Z 轴，而不管实际激活的坐标形式。在不同的坐标系下，X 轴、Y 轴和 Z 轴代表的意义也不同。

（1）笛卡儿坐标形式：X 轴、Y 轴和 Z 轴分别代表其原始意义。

（2）柱坐标形式：X 轴、Y 轴和 Z 轴分别代表径向 R、周向θ和轴向 Z。

（3）球坐标形式：X 轴、Y 轴和 Z 轴分别代表 R、θ和 Φ。

（4）柱坐标形式：X 轴、Y 轴和 Z 轴分别代表径向 R、周向θ和轴向 Y。

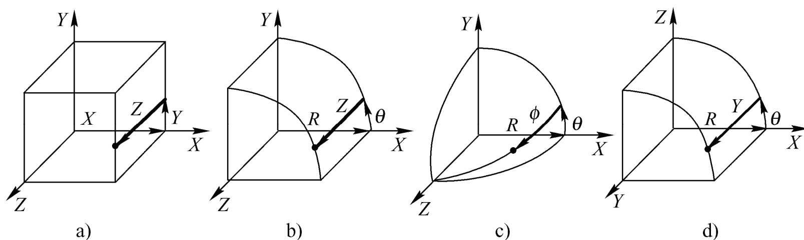


图 3-1　总体坐标系示意图

a) 笛卡儿坐标系　b) Z 轴柱坐标系　c) 球坐标系　d) Y 轴柱坐标系

执行 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to 菜单命令，弹出图 3-2 所示的坐标系选择子菜单，选择要激活的坐标系，实现总体坐标系的激活。

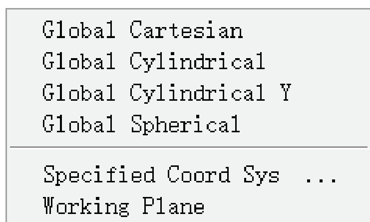


图 3-2　坐标系选择子菜单

（1）Global Cartesian：激活笛卡儿坐标（默认选项）。

（2）Global Cylindrical：激活 Z 轴为主轴的柱坐标系。

（3）Global Cylindrical Y：激活 Y 轴为主轴的柱坐标系。

（4）Global Spherical：激活球坐标系。

（5）Specified Coord Sys：激活指定坐标系。

（6）Working Plane：激活坐标系与工作平面一致。

命令：CSYS

2. 局部坐标系

在很多情况下，为了特定的用途需要建立各种各样的局部坐标系。其原点可能与坐标系有一定的偏移，其坐标轴也可能与总体坐标系有一定的转角。

局部坐标系也主要包括笛卡儿坐标、柱坐标和球坐标 3 种形式。总体坐标系和局部坐标系是构建其他坐标系（包括节点坐标系、单元坐标系等）的基础。

（1）局部坐标系的创建。

局部坐标系的创建主要有 4 种方式：按总体笛卡儿坐标系定义局部坐标系、通过已有节点定义局部坐标系、通过已有关键点定义局部坐标系和在当前工作平面定义局部坐标系。

按总体笛卡儿坐标系定义局部坐标系，执行 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At WP Origin 菜单命令，弹出图 3-3 所示的 Create Local CS at WP Origin 对话框。

命令：CSWPLA

在 KCN　Ref number of new coord sys 文本框中输入所建立的坐标系的编号，要求必须

取大于 10 的数值。KCS　Type of coordinate system 下拉列表框中选择要建立的坐标系类型，后面两项为椭圆坐标系和圆环坐标系的参数。

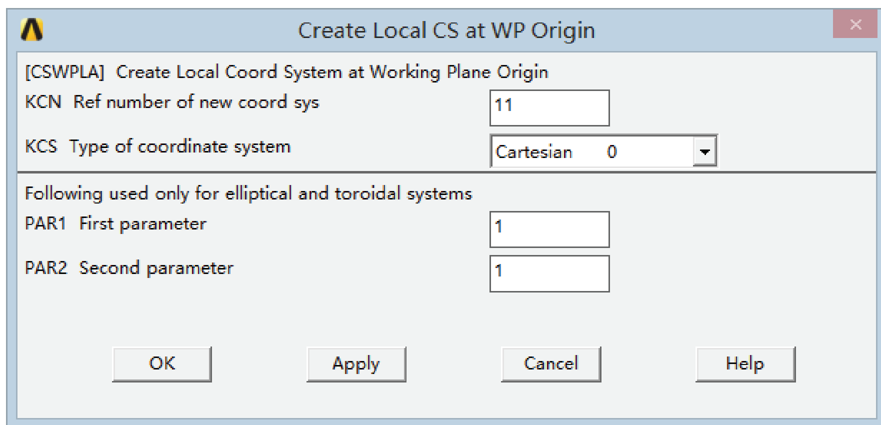


图 3-3　Create Local CS at WP Origin 对话框

以这种方式建立的局部坐标系的各个坐标轴与工作平面的各个轴重合，只须指定坐标表达形式即可。

通过已有关键点定义局部坐标系，执行 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→By 3 keypoints 菜单命令，弹出拾取对话框，拾取 3 个关键点，弹出局部坐标系定义对话框，定义局部坐标系。

命令：CSKP

以这种方式定义的坐标系，与关键点的选取顺序有关。坐标系的确定方法如下：第 1 个选取的关键点将成为坐标系的原点，第 1 个关键点到第 2 个关键点的方向为 X 轴，3 个关键点构成的平面为 XY 面，Y 轴为此平面垂直于 X 轴正向方向，且由第 3 个节点的位置确定 Y 轴，根据右手法则确定 Z 轴。

通过已有节点定义局部坐标系，执行 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→By 3 Nodes 菜单命令，弹出拾取对话框，拾取 3 个节点，弹出局部坐标系定义对话框，定义局部坐标系。

命令：CS

采用这种方式定义的坐标系与通过关键点定义的坐标系类似，与关键点的选取顺序有关。

在当前工作平面定义局部坐标系，执行 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Create Local CS→At Specified Loc 菜单命令，弹出拾取对话框，拾取自定义坐标系的原点或者直接输入坐标值按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，弹出图 3-4 所示的对话框。

命令：LOCAL

如前所述，在 KCN 项输入所建立的坐标系的编号，要求必须取大于 10 的数值。KCS 项选择要建立的坐标系类型，XC,YC,ZC Origin of coord system 项输入坐标系的原点值，THXY、THYZ 和 THZX 项分别输入坐标系的旋转角度值。

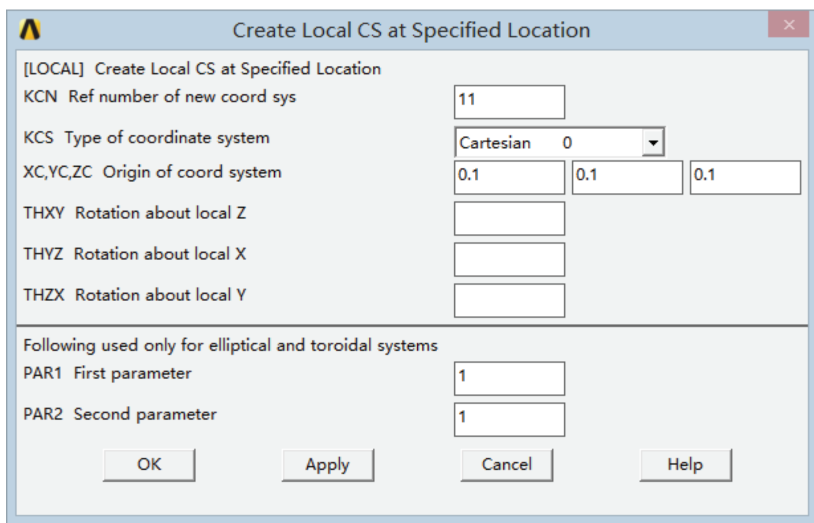


图 3-4 Create Local CS at Specified Location 对话框

（2）删除局部坐标系。

执行 Utility Menu→WorkPlane→Local Coordinate Systems→Delete Local CS 菜单命令，弹出 Delete Local CS 对话框，选择要删除的局部坐标系进行删除。

命令：CSDELE

（3）局部坐标系的激活。

用户可以定义任意多个坐标系，但某一个时刻只能有一个坐标系被激活（在模型操作过程中，输入的坐标值是以激活坐标系为参照的）。ANSYS 初始默认的坐标系是总体笛卡儿坐标系，ANSYS 初始默认的激活坐标系是总体笛卡儿坐标系。每当用户定义一个新的坐标系时，这个新的坐标系就会被自动激活。

执行 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Specified Coord Sys 菜单命令，输入要激活的坐标系编号。

命令：LOCAL

（4）列表显示所有坐标系列表。

查看所有总体坐标系和局部坐标系的相关信息的方法如下：

执行 Utility Menu→List→Other→Local Coord Sys 菜单命令。

命令：CSLIST

3.1.2 显示坐标系

显示坐标系可用于几何形状参数的列表和显示。在默认情况下，即使在其他坐标系中定义的节点和关键点，其列表显示输出的坐标值也是它们的总体笛卡儿坐标值。用户可以改变显示坐标系，但建议不这样做。

通过更改显示坐标系的种类，可以从不同角度查看一个模型。更改显示坐标系的方法为执行 Utility Menu→WorkPlane→Change Display CS to 菜单命令，确定显示坐标系。

命令：DSYS



3.1.3 节点坐标系

节点坐标系用于定义节点自由度的方向。每个节点都有自己的节点坐标系，在默认情况下，它总是平行于总体笛卡儿坐标系的。

在很多情况下都需要改变节点坐标系，将节点坐标系旋转到激活坐标系的方向，即将节点坐标系的 X 轴转成平行于激活坐标系的 X 轴或 R 轴，将节点坐标系的 Y 轴旋转成平行于激活坐标系的 Y 轴或θ轴，将节点坐标系的 Z 轴转成平行于激活坐标系的 Z 轴或Φ轴。

（1）执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Rotate Node CS→To Active CS 菜单命令，或命令 ROTATE，旋转至激活的坐标系。ROTATE 是比较有用的一个命令。

（2）也可以在生成节点时定义旋转角，或对已有节点定义旋转角（NMODIF），方法分别如下。

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active CS

命令：N

GUI：Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Rotate Node CS→By Angles

命令：NMODIF

3.1.4 单元坐标系

每个单元都有自己的坐标系，单元坐标系用于规定正交材料特性的方向、面压力的方向和结果（如应力和应变）的输出方向。所有的单元坐标系都是正交右手系。大多数单元坐标系的默认方向遵循以下规则。

（1）线单元的 X 轴通常从该单元的 I 节点指向 J 节点。

（2）壳单元的 X 轴通常也取 I 节点到 J 节点的方向，Z 轴过 I 点与壳面垂直，其正方向由单元 I、J 和 K 节点按右手法则确定，Y 轴垂直于 X 轴和 Z 轴。

（3）二维和三维实体的单元坐标系总是平行于总体笛卡儿坐标系的。

但并非所有单元坐标系都符合以上规则，对于特定的单元坐标系的默认方向可参考 ANSYS 帮助文档的单元说明。

3.1.5 结果坐标系

在求解过程中，得到的结果数据有位移、应力、应变等。在对结果数据进行显示、列表和单元数据存储时，这些数据通常先被转换到激活的坐标系（默认为总体坐标系）下，然后再输出。用户可以将激活的结果坐标系切换到总体坐标系或自定义的局部坐标系及求解坐标系（如节点和单元坐标系），采用的方法如下。

GUI：Utility Menu→List→Results→Options

命令：RSYS

3.2 工作平面的使用

工作平面是建模的一个辅助结构，它的灵活使用可以为建模提供极大的便利。在屏幕

上，光标只表现为一个点，但它实际上代表的是空间中垂直于屏幕的一条线。为了定位一个点，定义一个假想的平面，当该平面与光标代表的垂线相交时即确定空间中的唯一一点。这个假想平面就是工作平面。

工作平面是一个无限平面，有原点和二维坐标系等。在建立几何模型时，体素一般只能在当前工作平面内创建。进入 ANSYS 时，有一个默认的工作平面，即总体笛卡儿坐标系的 XY 平面，工作平面可以根据需要移动和删除。

3.2.1 定义一个新的工作平面

执行 Utility Menu→WorkPlane→Align WP with 菜单命令，打开工作平面定义子菜单，如图 3-5 所示。工作平面定义子菜单中各个命令的具体介绍见表 3-1。

```
Keypoints  +
Nodes  +
XYZ Locations  +
Plane Normal to Line  +
Active Coord Sys
Specified Coord Sys ...
Global Cartesian
```

图 3-5 工作平面定义子菜单

表 3-1 工作平面定义子菜单命令

菜单命令	作用	命令
Keypoints	由 3 个关键点定义一个工作平面，或通过一指定关键点的垂直于视向量的平面定义为工作平面	KWPLAN
Nodes	由 3 个节点定义一个工作平面，或通过一指定节点的垂直于视向量的平面定义为工作平面	NWPLANE
XYZ Locations	由 3 点定义一个工作平面，或通过一指定点的垂直于视向量的平面定义为工作平面	WPLANE
Plane Normal to Line	由过一指定线上的点的垂直于该直线的平面定义为工作平面	LWPLAN
Active CoordSysSpecified CoordSysGlobalCartesan	通过现有坐标系的 X 和 Y（或 R 和 θ）平面定义工作平面	WPCSYS

3.2.2 列表工作平面信息

为获得工作平面的位置、方向、增量等状态，执行 Utility Menu→List→Status→Working Plane 菜单命令，命令 WPSTYLE, STAT。

另外，可以通过命令 WPSTYLE, DEFA 将工作平面重置为默认状态下的位置和样式。

3.2.3 移动工作平面

在实际操作中，用户可以将工作平面的原点移动到已知关键点、节点和任意的坐标点上。执行 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP to 菜单命令，打开工作平面移动子菜单，如图 3-6 所示。各项具体介绍见表 3-2。

```
Keypoints  +
Nodes  +
XYZ Locations  +
Global Origin
Origin of Active CS
```

图 3-6 工作平面移动子菜单

表 3-2 工作平面移动子菜单命令

菜单命令	作用	命令
Keypoints	将工作平面的原点移动到关键点的中间位置	KWPAVE
Nodes	将工作平面的原点移动到节点的中间位置	NWPAVE
XYZ Locations	将工作平面的原点移动到指定点的中间位置	WPAVE
Global OriginOrigin of Active CS	将工作平面的原点移动到指定坐标系的原点位置	WPAVE

3.2.4 旋转工作平面

执行 Utility Menu→WorkPlane→Offset WP by Increments 菜单命令，弹出 Offset WP 工具栏，如图 3-7 所示。对话框顶端的 6 个按钮可以用来平移工作平面，下面是平移增量滚动条，可以单击按钮，即可调整工作平面平移的距离，也可在其下的文本框输入平移距离。

接下来的 6 个按钮用来控制工作平面的旋转，再下面是旋转角度滚动条，控制旋转角度的大小。

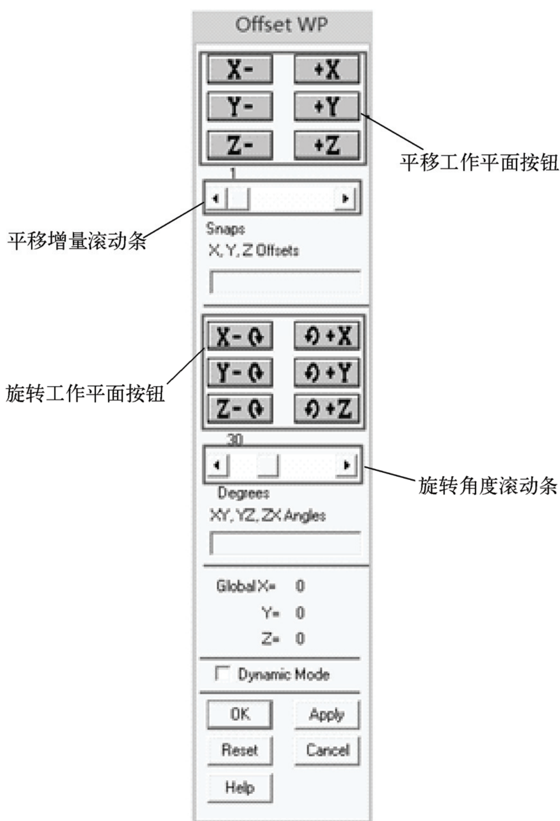


图 3-7 Offset WP 工具栏

3.3 本章小结

ANSYS 所提供的坐标系包括总体坐标系和局部坐标系、显示坐标系、节点坐标系、单元坐标系以及结果坐标系。合理使用坐标系和工作平面可以给建模计算过程带来很大的便利。本章主要对坐标系和工作平面作了比较详细的介绍。

第 4 章　创建几何模型



在 ANSYS 前处理器中建立几何模型是整个 ANSYS 分析过程中最关键、最花费时间，也是最容易出错的一步，包括建立图元、图元的选取和布尔操作等。本章将对 ANSYS 前处理器如何建立几何模型作详细的介绍。

学习目标：

（1）学习 ANSYS 中建立几何模型的不同方法；

（2）学习 ANSYS 中图元的选取方法；

（3）学习 ANSYS 中的布尔操作和其他操作。

4.1　概述

ANSYS 中几何模型的建立有两种方式，一种是通过常用的中间文件格式自 CAD 等软件导入，另一种方式就是在 ANSYS 前处理器中直接建模获得。在 ANSYS 前处理器中建立几何模型，是整个 ANSYS 分析过程中最关键、最花费时间，也是最容易出错的一步。

一个实体几何模型，均是由关键点（Keypoints）、线（Lines）、面（Areas）和体（Volumes）这些基本图元构成的。图 4-1 为一种典型的实体模型及其图元示意图。

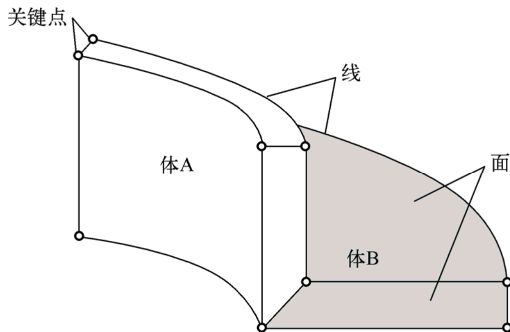


图 4-1　实体模型及其图元示意图

建立几何模型的所有操作均是在前处理器菜单的 Modeling 中完成的。建立几何模型的菜单命令为 Main Menu→Preprocessor→Modeling。在 Modeling 菜单中，Create 子菜单（见图 4-2）用来创建各种关键点、线、面、体；Operate 子菜单（见图 4-3）用来对各种图元（关键点、线、面、体）进行各种各样的操作，如粘贴、合并、减等操作；Move/Modify 子菜单（见图 4-4）用来对图元进行移动、修改；Copy 子菜单（见图 4-5）和 Reflect 子菜单（见图 4-6）则分别用来对图元进行复制和反射等，包括含网格或不含网格；Delete 子菜单（见图 4-7）则用来删除图元。

Create
Keypoints
Lines
Areas
Volumes
Nodes
Elements
Contact Pair
Circuit
Transducers

图 4-2　Create 子菜单

Operate
Extrude
Extend Line
Booleans
Intersect
Add
Subtract
Divide
Glue
Overlap
Partition
Settings
Show Degener
Scale
Calc Geom Items

图 4-3　Operate 子菜单

Move / Modify
Keypoints
Lines
Areas
Volumes
Nodes
Rotate Node CS
Elements
Transfer Coord
Reverse Normals

图 4-4　Move/Modify 子菜单

Copy
Keypoints
Lines
Areas
Volumes
Line Mesh
Area Mesh
Nodes
Elements

图 4-5　Copy 子菜单

Reflect
Keypoints
Lines
Areas
Volumes
Nodes
Elements

图 4-6　Reflect 子菜单

Delete
Keypoints
Hard Points
Lines Only
Line and Below
Areas Only
Area and Below
Volumes Only
Volume and Below
Nodes
Elements
Pre-tens Elemnts
Del Concats

图 4-7　Delete 子菜单

直接在 ANSYS 中进行实体建模时，可以分为自上而下（Top Down）和自下而上（Bottom Up）两种建模方法。自上而下的方法是先建立一些高级的几何图元，如方块、圆柱体等，然后将这些基础图元堆积并进行布尔运算，最后组合成最后的实体模型。

当构造一种体素时，ANSYS 将自动生成从属于该体元的低级图元。例如，构造立方体时，立方体上的点、线、面等低级图元自动生成。通过这种方式建立的实体模型，形状一般比较规则，适用于结构和形状比较简单的模型。

自下而上的方法则是先定义高级图元的重要参考点（Key Point），然后由点连接成线，由线组合成面，再由面合并成一个体，最后由体组合成完整的实体模型。关键点是实体模型中最低的图元。

在这个过程中，往往也需要运用布尔运算才能完成最后几何模型的建立。这种建模方式相对比较烦琐，但可以完成形状相对复杂的实体模型的建立。在实际应用中，大部分实体模型的建立是通过综合运用以上两种方式来完成的。

4.2　建立基本图元

无论是自上而下还是自下而上的建模方式，均是以直接或间接的方式建立各种图元，本节就 ANSYS 提供的关键点、线、面和体的建立方式作详细介绍，这些图元的建立均是在当前激活的坐标系中进行的。

1．关键点（Keypoint）

关键点是最低级的图形对象，用户可以直接建立关键点，也可以在布尔操作中根据已有关键点来生成。已建立的关键点也可以修改、移动和删除，但前提是该关键点没有依附于其

他高级图元。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints 菜单命令，展开图 4-8 所示的关键点建立子菜单，具体各命令的介绍见表 4-1。

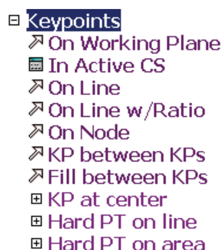


图 4-8 关键点建立子菜单

表 4-1 关键点建立子菜单命令

菜 单 命 令	作 用	命 令
On Working Plane	单击弹出拾取对话框，在工作平面上拾取点建立关键点	K
In Active CS	在当前激活坐标系中，根据坐标值定义关键点是最常用的关键点建立命令。单击弹出图 4-9 所示在当前激活坐标系下建立关键点对话框，NPT 项为待建立关键点的编号，此编号必须未被已有关键点占用。X,Y,Z 为待建立关键点在激活坐标系中的坐标值，单击 OK 按钮完成该关键点的建立	K
On Line	在已知直线上的给定位置定义关键点	KL
On Line w/Ratio	在已知线段上按给定的比例定义关键点	KL
On Node	在已知节点上定义关键点	KNODE
KP between KPs	在已有的两个关键点之间定义关键点，待定义关键点的位置由比例或者距离确定	KBETW
Fill between KPs	在已知的两个关键点之间插入一系列的关键点，待定义的关键点位置由插入点的个数和间距比例来确定	KFILL

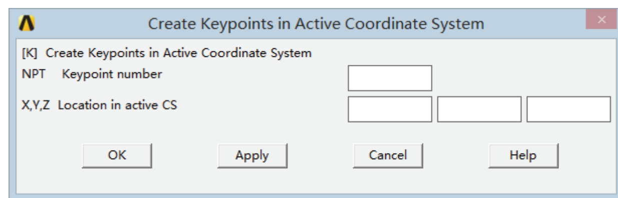


图 4-9 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

2．硬点（Hard Point）

硬点实际上是一种特殊的关键点，用户可利用硬点施加载荷或从模型线和面上的任意点获得数据。硬点不改变模型的几何形状和拓扑结构，大多数关键点命令（如 FK、KLIST 和 KSEL 等）都适用于硬点，而且硬点有自己的命令集和 GUI 中的部分。

如果用户发出更新图元几何形状的命令，例如布尔运算或简化命令，任何与图元相连的硬点都将被删去。因此，在完成实体模型之后应当将所有的硬点加入。如果删除一个联系着硬点的图元，硬点会出现以下情况：

■ 与图元一起被删除（如果硬点与其他任何图元都没有关系）；

■ 与被删除的图元分离（如果硬点与另外的图元相连）；

■ 不能用复制、移动或修改关键点的命令操作硬点，硬点有其自己的命令和 GUI 控制。当使用硬点时不支持映射网格划分。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints 菜单命令，在弹出的图 4-8 的关键点建立子菜单中，最后两项 Hard PT on line 和 Hard PT on area 分别是在线上和在面上建立硬点，其展开子菜单如图 4-10 所示。

（1）Hard PT by ratio：通过定义比例定义硬点。

（2）Hard PT by coordinates：通过坐标值定义硬点。

（3）Hard PT by picking：通过拾取定义硬点。

3．线（Line）

线主要用于表示物体的边，并不总是需要明确定义所有的线，因为 ANSYS 程序在定义面和体时会自动生成相关的线。只有在生成线单元或想通过线来定义面时，才需要明确定义线。线包括直线、圆弧线及样条线等几种样式，执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines 菜单命令，展开图 4-11 所示线定义子菜单，具体各项介绍如下。



图 4-10　硬点定义子菜单



图 4-11　线定义子菜单

（1）定义直线。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines 菜单命令，展开直线定义子菜单，具体各命令见表 4-2。

表 4-2　直线定义子菜单命令

菜 单 命 令	作　用	命　令
Straight Line	拾取两关键点建立直线，不考虑坐标系	LSTR
In Active Coord	通过两个关键点创建直线或曲线	L
Overlaid on Area	在选中面上的两个关键点之间创建一条覆盖在该面上的最短线	LAREA
Tangent to Line	生成一条与曲线（P1-P2）相切于 P2 并与之相切的直线（P2-P3）	LTAN
Tan to 2 Lines	生成一条与已知两线（P1-P2）和（P3-P4）分别相切于 P2 和 P3 的直线（P2-P3）	L2TAN
Normal to Line	过线外一关键点生成与已知线成一定角度的直线，并将原直线分割	LANG
Normal to 2 Lines	生成与两条已知不相交直线垂直并相交的直线，并将原来的两条线分割	L2ANG
At angle to line	过线外一关键点生成与已知线成一定角度的直线，并将原直线分割	LANG
Angle to 2 Lines	生成一条与已知两直线成一定角度的直线，并将原直线分割	L2ANG

（2）定义圆弧。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs 菜单命令，展开圆弧定义子菜单，如图 4-12 所示，具体各命令见表 4-3。



图 4-12　圆弧定义子菜单

表 4-3　圆弧定义子菜单命令

菜 单 命 令	作　　用	命　　令
Through 3 KPs	通过 3 个关键点来创建一段圆弧，拾取圆弧的起点和终点，再拾取确定圆弧形状和角度的关键点	LARC
By End KPs&Rad	通过端点和半径创建圆弧，拾取圆弧的两个端点，再拾取圆心方向任意一点确定圆弧方向，输入半径确定圆弧	LARC
By Cent&Radius	通过圆心和半径创建圆弧，拾取圆心，固定半径值，输入圆弧的角度和圆弧所含线段数。只在获得坐标的 XY 平面有效，以半径确定单击位置为起点，逆时针确定角度量	CIRCLE
Full Circle	建立圆，拾取圆心，固定半径值确定圆。仅在活动坐标系的 XY 平面有效	CIRCLE

（3）定义样条曲线。

样条曲线主要用于构造光滑的、复杂的产品结构外形表面。在构造曲线型的结构表面时，手工构造比较困难，一般通过给出曲线型表面一些点的坐标，然后用样条曲线构造出光滑曲面。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Splines 菜单命令，展开样条曲线定义子菜单，如图 4-13 所示，具体各项命令见表 4-4。



图 4-13　样条曲线定义子菜单

表 4-4　样条曲线定义子菜单命令

菜 单 命 令	作　　用	命　　令
Spline thru Locs	通过两个关键点确定样条曲线的两个端点，再通过其他位置的选取确定样条曲线的路线	BSPLIN
Spline thru KPs	通过依次选取的一系列关键点确定样条曲线的形状，生成一条样条曲线，除两端点的关键点从属于所生成的曲线外，其他关键点与其修改、删除等操作无关	BSPLIN
Segmented Spline	通过依次选取的一系列关键点确定样条曲线的形状，生成被中间关键点所分割的样条曲线	SPLINE
With Options	在以上 3 种样条曲线的建立过程中，添加可以设置对样条曲线始点和末端点的切线方向的控制	BSPLIN BSPLIN SPLINE

（4）自动生成圆弧。

在两条相交的线的交点附近生成一个圆弧，圆弧与两条线相切，并将两条线在切点处断

开，两条线在节点附近被切断。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Line Fillet 菜单命令，展开线拾取子菜单。

拾取相交的两条直线，弹出图 4-14 所示的 Line Fillet 对话框，NL1 和 NL2 会自动根据所拾取的线显示线的编号，RAD 为圆弧的半径值，PCENT 为圆弧的圆心关键点，若缺省或为 0 则不生成圆心关键点。

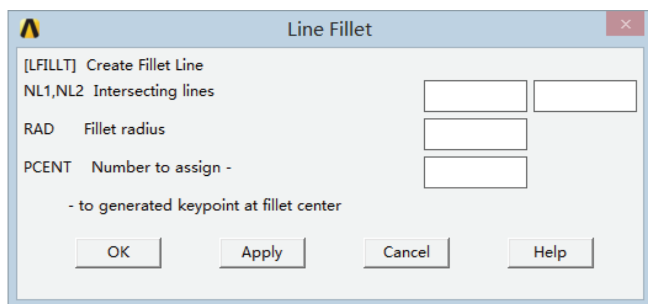


图 4-14 Line Fillet 对话框

4．面（Area）

在 ANSYS 分析问题中，通常采用平面表示二维实体，如平板或轴对称体。平面和曲面都可以表示三维的面，如壳、三维实体的面等。当要用到面单元（如板单元）或曲面生成体时才需要定义面。

生成面的命令也将自动生成依附于该面的线和关键点；同样，面也可以在定义体时自动生成。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas 菜单命令，展开面定义子菜单，如图 4-15 所示，具体各项介绍如下。

（1）定义任意形状的面。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary 菜单命令，展开任意形状面的定义子菜单，如图 4-16 所示，具体各项命令见表 4-5。

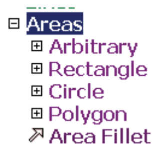


图 4-15 面定义子菜单

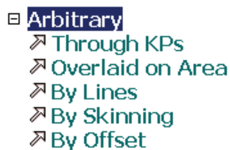


图 4-16 任意形状面的定义子菜单

表 4-5 任意形状面定义子菜单命令

菜单命令	作用	命令
Through KPs	通过若干个关键点创建一个面，关键点按照面周围依次选取	A
Overlaid on Area	在一个已选定的面上挑出一些关键点，通过这些关键点创建一个新的面	ASUB
By Lines	通过若干条线创建一个面，所选面必须首位相接构成一个封闭的区域	AL
By Skinning	通过一系列线生成蒙皮的光滑曲面，除了端部的两条线，其他线不附属于所生成的面	ASKIN
By Offset	通过平移一个面生成另一个面，原来的面保留	AOFFST

（2）定义矩形。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle 菜单命令，展开矩形定义子菜单，如图 4-17 所示。具体各项介绍见表 4-6。



图 4-17　矩形定义子菜单

表 4-6　矩形定义子菜单命令

菜 单 命 令	作　　用	命　　令
By 2 Corners	通过拾取两个点作为矩形的对角，或输入一个角的坐标值然后输入矩形长度和宽度，来创建矩形	BLC4
By Centr&Cornr	通过拾取矩形的形心（中心点）和矩形的一个定点来创建矩形，或者输入矩形的形心坐标以及矩形的长度和宽度来创建矩形。	BLC5
By Dimensions	通过输入矩形的两个对角的坐标值来创建矩形。执行 By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Block by Dimensions 对话框，X-coordinates 和 Y-coordinates 分别为两个对角的 X 坐标值和 Y 坐标值，是矩形创建比较常用的一种方式	RECTNG

（3）定义圆。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle 菜单命令，展开圆定义子菜单，如图 4-18 所示。具体各项命令介绍见表 4-7。

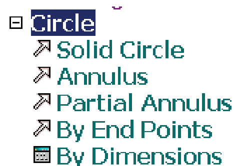


图 4-18　圆定义子菜单

表 4-7　圆定义子菜单命令

菜 单 命 令	作　　用	命　　令
Solid Circle	通过圆心坐标和半径值来创建圆	CYL4
Annulus	通过圆心坐标和圆环的两个半径来创建圆环	CYL4
Partial Annulus	通过圆心坐标、圆环的两个半径和两个圆心角（第一个圆心角确定该圆环的起始点，第二个圆心角则是确定该圆环的终点）来创建圆环	CYL4
By End Points	通过输入直径的两个端点坐标来创建一个圆面	CYL5
By Dimensions	通过输入圆的半径和两个圆心角来创建圆环（第一个圆心角确定该圆环的起始点，第二个圆心角则是确定该圆环的终点），圆心为当前激活坐标的坐标原点	PCIRC

（4）定义正多边形。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Polygon 菜单命令，展开正多边形定义子菜单，如图 4-19 所示。具体各项命令介绍见表 4-8。



图 4-19 正多边形定义子菜单

表 4-8 正多边形定义子菜单命令

菜单命令	作用	命令
Trignge, Square, Pentagon, Hexagon, Septagon, Octagon	分别定义正三角形、正方形、正五边形、正六边形、正九边形、正八边形，通过形心坐标确定位置，外接圆半径和角度值确定形状	RPR4
By Inscribed Rad	设置内切圆的半径来创建正多边形，所建立的多边形的形心在当前激活坐标的坐标原点	RPOLY
By Circumscr Rad	设置外接圆的半径来创建正多边形，所建立的多边形的形心在当前激活坐标的坐标原点	RPOLY
By Side Length	设置多边形的边长来创建正多边形，所建立的多边形的形心在当前激活坐标的坐标原点	RPOLY
By Vertices	通过在工作平面上拾取顶点来创建多边形	PRI2

（5）定义倒角面。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Area Fillet 菜单命令，拾取两个相交面，单击 OK 按钮，弹出图 4-20 的 Area Fillet 对话框，NA1,NA2 为拾取的两个面，RAD 为倒角的半径，单击 OK 按钮完成。原来的两个面在切线处被切断，原来两条线相交的部分会被删除。

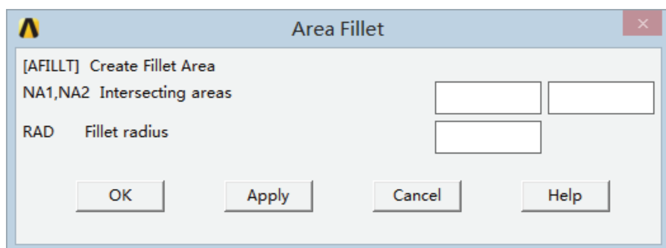


图 4-20 Area Fillet 对话框

5．体（Volume）

体用于描述三维实体，计算时须用到体单元。生成体的方式多种多样，可由顶点定义体，可由边界面定义体，也可将面沿一定路径拖拉或扫掠生成。当体生成时，将自动生成其低级图元，如依附于体的关键点、线、面等。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes 菜单命令，展开体生成子菜单，如图 4-21 所示，包括创建一个任意形状的三维物体、长方体、圆柱体、球体、圆锥体和圆环体等三维几何实体，具体各项命令介绍如下。

（1）创建任意形状三维物体。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Arbitrary 菜单命令，展开任意形状三维物体定义子菜单，如图 4-22 所示。具体各项命令介绍见表 4-9。

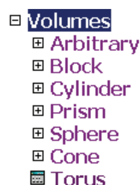


图 4-21 体生成子菜单



图 4-22 任意形状三维物体定义子菜单

表 4-9 任意形状三维物体定义子菜单命令

选 项	作 用	命 令
Through KPs	通过拾取关键创建三维实体，关键点的数目必须是 4、6 或 8，且不能处于同一个平面	V
By Areas	通过拾取边界面生成实体，这些面必须是封闭的	VA

（2）创建长方体。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block 菜单命令，展开长方体定义子菜单，如图 4-23 所示。具体各项命令介绍见表 4-10。



图 4-23 长方体定义子菜单

表 4-10 长方体定义子菜单命令

选 项	作 用	命 令
By 2 Corners&Z	通过定义长方体一角点和长、宽、高来创建长方体	BLC4
By Centr,Cornr,Z	通过长方体一面的形心，该面的长、宽以及体的厚度来创建长方体	BLC5
By Dimensions	通过长方体对角线两端点的坐标值来创建长方体	BLOCK

（3）创建圆柱体。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder 菜单命令，展开圆柱体定义子菜单，如图 4-24 所示。具体各项命令介绍见表 4-11。

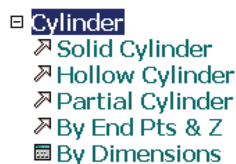


图 4-24 圆柱体定义子菜单

表 4-11 圆柱体定义子菜单命令

菜单命令	作　用	命　令
Solid Cylinder	通过输入圆柱底面圆心坐标、半径及圆柱的高度来创建一个实心圆柱体	CYL4
Hollow Cylinder	通过空心圆柱底面圆心坐标、内外半径及圆柱高度来创建空心圆柱	CYL4
Partial Cylinder	通过空心圆柱底面圆心坐标、内外半径及空心圆柱开始和结束角度、圆柱高度来创建任意弧长的空心圆柱	CYL4
By End Pts&Z	通过圆柱底面的直径两端点的坐标和圆柱高度来创建圆柱	CYL5
By Dimensions	通过圆柱体内外半径、圆柱体两底面 Z 坐标、起始角度和结束角度来创建圆柱，圆柱体底部圆心为当前激活坐标系的坐标原点	CYLIND

（4）创建棱柱体。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Prism 菜单命令，展开棱柱体定义子菜单，如图 4-25 所示。具体各项命令介绍见表 4-12。

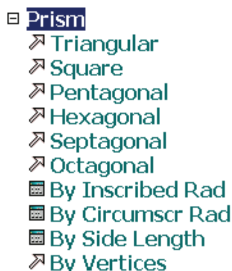


图 4-25 棱柱体定义子菜单

表 4-12 棱柱体定义子菜单命令

菜单命令	作　用	命　令
Triangular、Square、Pentagonal、Hexagonal、Septagonal、Octagonal	分别为正三棱柱、正四棱柱、正五棱柱、正六棱柱、正九棱柱和正八棱柱的定义选项，其定义方式和三棱柱相似	RPR4
By Inscribed Rad	通过定义正棱柱底面内切圆半径和高度来创建正棱柱，其中正棱柱底面形心位于当前激活坐标系的坐标原点	RPRISM
By Circumscr Rad	通过正棱柱底面外接圆高度来创建正棱柱，其中正棱柱底面形心位于当前激活坐标系的坐标原点	RPRISM
By Side Length	通过正棱柱底面边长、边数、棱柱高度来创建正棱柱，其中正棱柱底面形心位于当前激活坐标系的坐标原点	RPRISM
By Vertices	通过正棱柱多边形定点和棱柱高度来创建不规则棱柱，拾取工作平面上的一系列的点确定棱柱底面形状，再确定棱柱高度	PRI2

（5）创建球体。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Sphere 菜单命令，展开球定义子菜单，如图 4-26 所示。具体各项命令介绍见表 4-13。



图 4-26 球体定义子菜单

表 4-13 球体定义子菜单命令

菜单命令	作用	命令
Solid Sphere	通过球心和半径来创建实心球体。球心坐标为当前激活坐标系的 XY 平面上的 X 坐标和 Y 坐标。其低级图元包括以 XY 平面分割的两个面，位于 XY 平面的平均分割的 4 条线	SPH4
Hollow Sphere	通过球心和内、外球半径来创建空心心球体。球心坐标为当前激活坐标系的 XY 平面上的 X 坐标和 Y 坐标。生成的线位于激活坐标系的 XY 平面上，面在球体上以 XY 平面为分割	SPH4
By End Points	通过球直径的两端点来创建实心球体。端点为球体位于当前激活坐标系的 XY 平面上直径的两端点的坐标值，完成球体的创建	SPH5
By Dimensions	通过球的尺寸建立球体，包括球的内外半径、起始角度、结束角度等	SPHERE

（6）创建圆台（锥）体。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cone 菜单命令，展开圆台（锥）体定义子菜单，如图 4-27 所示，具体各项命令介绍见表 4-14。



图 4-27 圆台（锥）体定义子菜单

表 4-14 圆台（锥）体定义子菜单命令

菜单命令	作用	命令
By Picking	通过工作平面上的圆心、圆台上下两个截面的半径及圆台的高度来创建圆台（锥）体	CON4
By Dimensions	通过圆台（锥）体尺寸来创建圆台（锥）体（包括圆台（锥）体的底面半径，顶面半径、圆台（锥）沿着 Z 轴方向的位置标 Z1、Z2，分割圆台（锥）的起始角度和结束角度）	CONE

（7）创建圆环体。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Torus 命令，打开 OreateTorus by Dimensions 对话框，如图 4-28 所示，通过圆环的尺寸来创建圆环。

其中 Cuter radius（RAD1）、Optional inner radius（RAD2）和 Major radius of torus（RADMAJ）的示意图如图 4-29 所示。若要创建实心圆环，则将 Optional inner radius 默认或设为 0。

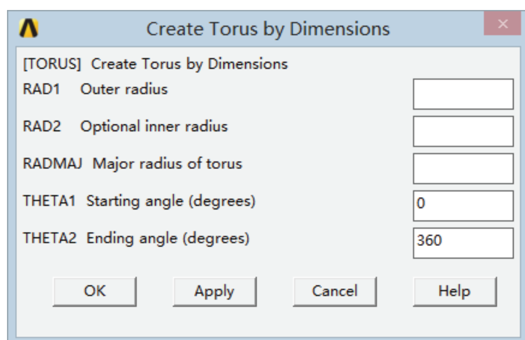


图 4-28 Create Torus by Dimensions 对话框

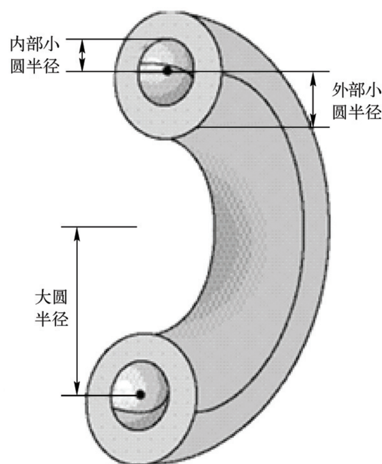


图 4-29 圆环半径示意图

命令：TORUS

4.3 拖拽方式建立模型

以拖拽方式建立模型是在已建立的图元样式基础上，沿着一定直线、坐标或轴拖拽，得到维数更高一级的图元的方式。若图元样式含有网格，则可以直接得到带有网格的更高一级的实体模型。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Extrude 菜单命令，展开拖拽子菜单，如图 4-30 所示。

1．Elem Ext Opts

在拖拽生成的图元含有单元时，控制单元属性，如单元类型、材料属性、单元坐标系、实常数等。

在含有单元的拖拽运行中，相对于基础的图元样式，新生成的图元单元维数更高一级，即对于一维单元拖拽生成二维单元，对二维单元拖拽生成三维单元。

2．Areas

展开面拖拽子菜单，如图 4-31 所示，对面进行拖拽生成体，其方式、作用及命令见表 4-15。若面上已经有单元，且事先执行了 Elem Ext Opts 命令，则生成的体会包含有所定义属性的单元。

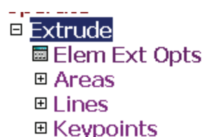


图 4-30　拖拽子菜单



图 4-31　面拖拽子菜单

表 4-15　面拖拽子菜单命令

菜单命令	作　用	命　令
Along Normal	沿面的法线方向拖拽面生成体	VOFFST
By XYZ Offset	根据 X、Y、Z 坐标的偏移拖拽面生成体	VEXT
About Axis	绕着一定轴拖拽面生成体	VROTAT
Along Lines	沿着一条线拖拽面生成体	VDRAG

3．Lines

展开线拖拽子菜单，如图 4-32 所示。对线拖拽生成面，其方式、作用及命令见表 4-16。若线上已经有单元，且事先执行了 Elem Ext Opts 命令，则生成的面会包含有所定义属性的单元。



图 4-32　线拖拽子菜单

表 4-16　线拖拽子菜单菜单命令

选　　项	作　　用	命　　令
About Axis	绕着一定轴拖拽线生成面	AROTAT
Along Lines	沿着一条线拖拽线生成面	ADRAG

4．Keypoints

展开关键点拖拽子菜单，与线拖拽子菜单类似，只是生成的是线。

4.4　图元的选取

在 ANSYS 程序分析过程中，有时候要将模型的某一部分提取出来进行操作，这时实体选择功能就显得十分重要了。使用 Select 对实体进行部分选择，然后通过 Plot 功能或 List 功能将这一部分显示并罗列出来。

ANSYS 除了对模型的基本图元进行选择操作外，还可以根据需要将模型基本图元的一部分合成一个构件（Component），赋予一个名字，并在以后的操作中以访问构件名称的方式随时选中该构件并进行相关操作。此外，构件还可以进一步组合成更高级的单位，成为部件集合（Assembly）。

1．实体图元的选择

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出图 4-33 所示的 Select Entities 对话框，进行图元的选择。

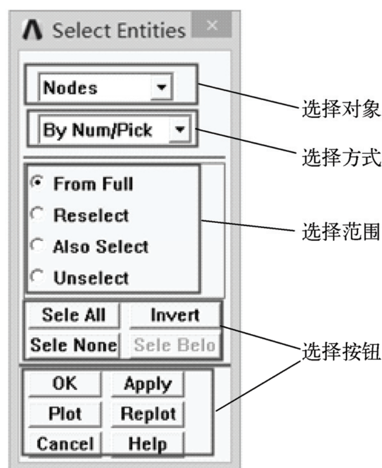


图 4-33　Select Entities 对话框

（1）选择对象。

提供的选择对象包括节点（Node）、单元（Element）、体（Volume）、面（Area）、线（Line）和关键点（Keypoint）。相应的命令如下。

- 节点：NSEL。
- 单元：ESEL。
- 体：VSEL。
- 面：ASEL。
- 线：LSEL。
- 关键点：KSEL。

（2）选择方式。

对于不同的选择对象，ANSYS 提供了各不相同的选择方式，见表 4-17。

表 4-17　不同对象的选择方式

选择对象	选择方式	作用描述
节点	By Num/Pick	通过拾取在绘图区域选择所要的节点
	Attached to	选取附属于其他图元上的节点，此选项必须在其他的实体单元选定的情况下才能完成
	By Location	根据节点的坐标位置进行选择，以当前激活坐标为准
	By Attributes	通过节点的一些属性选择节点
	Exterior	选定单元表面的节点，操作之前首先要选定相应的单元
	By Results	根据求解结果选定节点。在此操作进行之前，程序对模型必须进行一次分析求解过程
单元	By Num/Pick	通过拾取在绘图区域选择所要的单元
	Attached to	选取附属于其他实体上的单元，此选项必须在其他的实体选定的情况下才能完成
	By Attributes	通过单元的一些属性选定符合条件的单元
	By Results	把单元的求解结果作为选择单元的标准，类似于节点
	By Elem Name	通过单元名或单元编号选取单元
	Live Elem's	选择那些已经被定义处于生状态或者死状态的单元
	Adjacent to	选定与已知单元相邻的单元
体	By Num/Pick	通过拾取在绘图区域选择所要的体
	Attached to	选取附属于选定面上的体
	By Location	根据体的坐标位置选定体，以当前激活坐标为准
	By Attributes	通过指定的某些属性选择符合条件的体
面	By Num/Pick	通过拾取在绘图区域选择所要的面
	Attached to	选取附属于选定线或体的面
	By Location	根据面的坐标位置选定面，以当前激活坐标为准
	By Attributes	通过指定的某些属性选择符合条件的面
	Exterior	选取事先选定的体表面的面
	By Hard Points	选取那些包含已选定硬点的面
	Concatenated	选取那些有面连接生成的面

（续）

选择对象	选择方式	作用描述
线	By Num/Pick	通过拾取在绘图区域选择所要的线
	Attached to	选取附属于选定面或关键点的线
	By Location	根据线的坐标位置选定线，以当前激活坐标系为准
	By Attributes	通过指定的某些属性选择符合条件的线
	Exterior	选取事先选定的面表面的线
	By Hard Points	选取那些包含已选定硬点的线
	By Length/Rad	根据线的长度或者线的曲率半径选择符合条件的线，需要输入线长或者半径的最大最小值以及增量步长
	Concatenated	选取那些由线连接生成的线
关键点	By Num/Pick	通过拾取在绘图区域选择所要的关键点
	Attached to	选取附属于选定节点或线的关键点
	By Location	根据关键点的坐标位置选定关键点，以当前激活坐标系为准
	By Attributes	通过指定的某些属性选择符合条件的关键点
	Exterior	选取事先选定的线上的关键点
	By Hard Points	选取那些是硬点的关键点

（3）选择范围。

在 Select Entities 对话框中提供了一些功能命令方便用户的选取，相应命令的功能如下。

■ From Full：从整个模型中选取符合条件的图元。

■ Reselect：在上次选取的图元范围内选取图元。

■ Also Select：在上次选取图元的基础上，继续选取新的图元。

■ Unselct：在已有选取的图元基础上，取消部分图元的选择。

■ Sele All：选择所有符合选择条件的图元。

■ Invert：进行反向选取，选取没有选中的那部分图元。

■ Sele None：取消所有的选取操作，使整个模型都不被选中。

2．Comp/Assembly 功能

此选项为构件和部件的创建和选择功能菜单，用户可以通过执行 Utility Menu→Select→Component Manager 菜单命令打开 Component Manager 对话框来实现，如图 4-34 所示，也可以通过执行 Utility Menu→Select→Comp/Assembly 下的子菜单命令来实现，如图 4-35 所示。

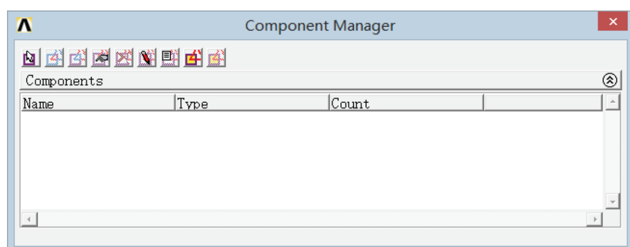


图 4-34　Component Manager 对话框

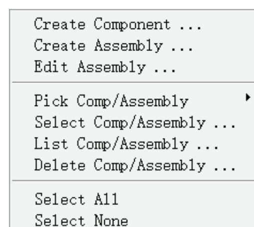


图 4-35　Comp/Assembly 子菜单

用户可以将一些常用实体组合构成一个构件（Component），并给这个构件赋予一个构件名；也可以将多个构件组合构造成一个部件集合（Assembly），部件也有自己的名字。用户可以随时通过该项对应的名称来访问这些构件和部件的实体。

下面对 Comp/Assembly 子菜单中的各项命令进行简单介绍。

（1）Create Component。

先选中组成构件的实体图元，再执行 Create Component 命令，弹出 Create Component 对话框，输入构件名和组成构件的实体类型，完成构件的创建。实体类型分为节点、单元、体、面、线和关键点。

（2）Create Assembly。

单击 Create Assembly，弹出创建部件的对话框，输入创建构件的名字并选定构成部件的所有构件，即可创建由这些构件构成的部件。

（3）Edit Assembly。

执行 Edit Assembly 命令，弹出编辑部件的对话框，选中要编辑的部件，对其中的构件进行删除或添加操作。

（4）Select Comp/Assembly。

执行 Select Comp/Assembly 命令，选择 by component name，弹出图 4-36 所示的 Select Comp onent or Assembly 对话框，在此对话框中对已定义的构件或部件进行选取。

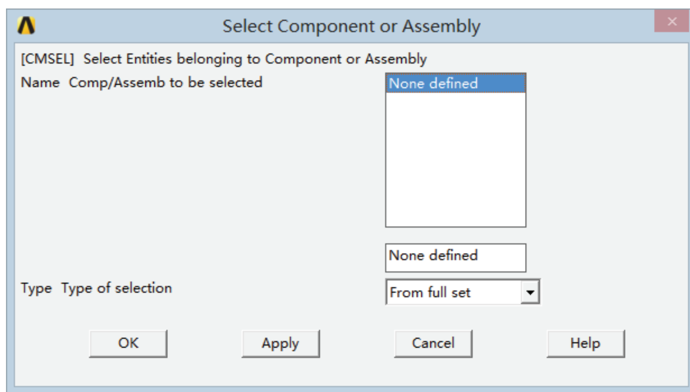


图 4-36　Select Comp onent or Assembly 对话框

（5）List Comp/Assembly。

该命令以文本形式列出构件和部件的组成情况。

（6）Delete Comp/Assembly。

该命令将已定义的部件或构件删除。

（7）Select All。

该命令选择所有创建的构件/部件构成的实体图元。

（8）Select None。

该命令选择所有创建的构件/部件构成的实体图元之外的图元。

3．Everything 功能

通过此功能选择模型上所有的实体，即所有的节点、单元、体、面、线和关键点等。

4．Everything Below 功能

在已选择的实体图元的基础上，选择其附属的低级图元。如选择 Selected Volumes，则选择了已选择体上的面、线、关键点以及单元和节点等。

4.5　布尔操作

在布尔运算中，对一组几何模型可使用交、并、差等逻辑运算处理。ANSYS 程序也允许用户对实体模型进行同样的操作。布尔运行的目的是为了构建更复杂的模型，或者是为了修改模型存在的问题。

无论是自下而上还是自上而下生成的实体模型，用户都可以对它进行布尔运算操作。但是需要注意的是，凡是通过连接生成的图元都对布尔运算无效，对退化的图元也不能进行某些布尔运算。

通常，若模型已经定义了实体的材料和单元属性，则布尔操作修改了已有模型，需要对材料和单元属性的重新定义。

1．布尔运算的设置

布尔运算有多种形式，在布尔运算前可进行相关的设置，执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Setting 菜单命令，对布尔运算进行设置，包括运算完成后是否保留原始图形、控制布尔运算异常时弹出的消息对话框、对布尔运算产生的图形编号的控制以及容差的设置等。

2．交运算（Intersect）

交运算操作规则是由多个图形的共同部分形成一个新的图形，交表示两个或多个图形的重复区域。这个新区域可能与原始图形有相似的维数，也可能低于原始图形的维数。例如，两条线的交运算可能是一个关键点，也可能是一条线。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Intersect 菜单命令，打开交运算子菜单，如图 4-37 所示。

其中，Common 命令和 Pairwise 命令均包括线线相交、面面相交和体体相交等。其区别是 Common 命令结果为所有图元的重复区域，而 Pairwise 命令为任意两个图元的重复区域。

图 4-38 所示为建立的一个正方体、一个球体和一个圆柱体，图 4-39 所示为采用 Common 命令进行交运算的结果，图 4-40 所示为采用 Pairwise 命令进行交运算的结果，所属于各个体的区域单独存在。

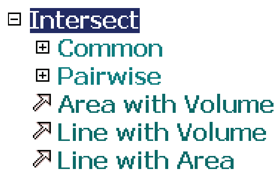


图 4-37　交运算子菜单

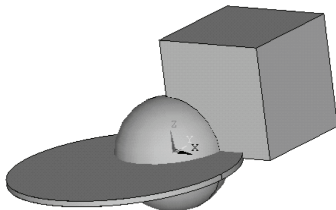


图 4-38　定义的正方体、球体和圆柱体

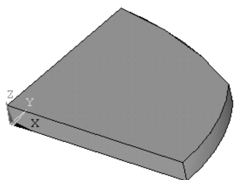


图 4-39　Common 相交运算结果

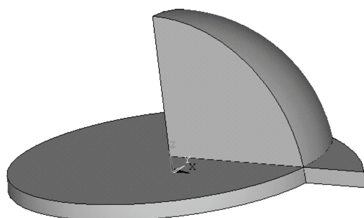


图 4-40　Pairwise 相交运算结果

另外，还可以进行面和体、线和体以及面和线的交运算操作。

3．加运算（Add）

加运算即得到一个包含所有原始输入图元的新图元，形成的新图元是一个单一的整体，没有接缝，包括体的相加、面的相加和线的相加等。如图 4-38 所示的正方体、球体和圆柱体相加之后就组合成为一个体。

4．减运算（Subtract）

减运算是从一个实体减去另一个实体，运算后得到的是被减实体去掉公共区域的部分。运算结果可能是一个与被减实体相同维数的实体，也可能将被减实体分成两个或多个新的实体。新的实体之间可以有共同的边界，也可有不同但重合的边界。

减操作包括体的相减、面的相减和线的相减。在图 4-38 所示的正方体、球体和圆柱体中，正方体减去圆柱体和球体之后的图元如图 4-41 所示。

另外，还可以通过 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Subtract→With Options 下的减操作菜单命令，控制减操作之后公共区域以及减实体等是否保留等。

5．分割运算（Divide）

分割运算是将实体图元通过工作平面、体、面、线等分割成两部分或更多。

图 4-42 为分割运算子菜单，包括工作平面分割体、面、线，体分割面、线，面分割体、面、线，线分割面、线，控制分割线等，并且可以通过 With Options 命令控制分割操作之后被分割图元和分割图元的保留情况。

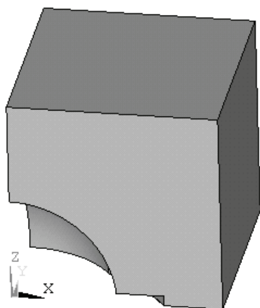


图 4-41　减运算结果

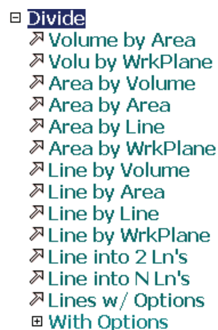


图 4-42　分割运算子菜单

6．粘合运算（Glue）

粘合运算用于两个实体的公共区域存在于边界并且比实体图元低一个维度的情况，粘合操作之后两个实体通过相交区域连接在一起，包括体粘合、面粘合和线粘合。图 4-43 所示

为粘合两面的粘合操作示意图。

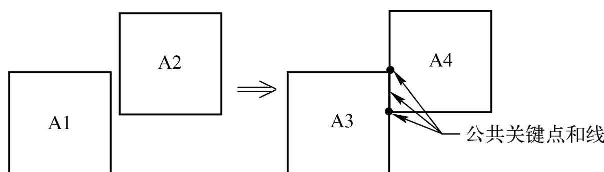


图 4-43　面粘合操作示意图

7．搭接运算（Overlap）

搭接运算将两个或更多实体组合成 3 个或更多的新实体，包含原始实体的所有部分，与加操作类似，但交界面仍然存在。因此，相对于加操作产生的一个复杂的体，搭接操作产生很多个简单体。图 4-44 所示为搭接两体的操作示意图。

8．互分运算（Overlap）

互分运算将两个或多个实体组合成 3 个或更多的新实体。如果搭接区域与原始图元有相同的维数，那么互分结果与搭接结果相同。但是与搭接操作不同的是，没有参加搭接的输入图元将不被删去。图 4-45 所示为互分两体的操作示意图。

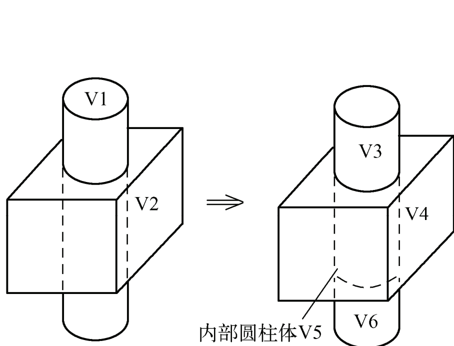


图 4-44　体搭接操作示意图

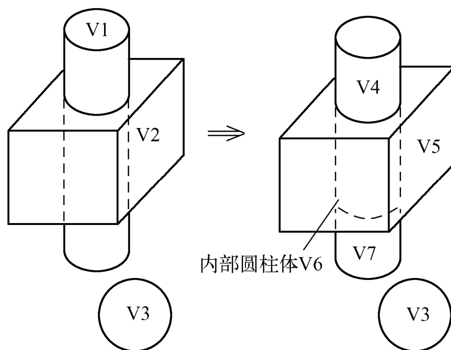


图 4-45　体互分操作示意图

4.6　其他操作

在实体模型的创建过程中，除了应用基本的图元建立和布尔操作来最终建立模型外，还可以根据具体情况采用其他的一些操作，如对相同的结构进行复制、对于对称结构进行镜像等。操作对象可以是单个图元，也可以是组合后的实体模型等。

1．移动和旋转

如果创建实体的位置和方向不理想，用户可以通过移动和旋转功能进行调整。

对图元移动的操作方式为执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move/Modify 菜单命令，打开 Move/Modify（移动/修改）子菜单，其中提供了对包括点、线、面、体、节点等图元对象移动的命令。

以体为例，执行 Volumes 命令，拾取要移动或修改的体，弹出图 4-46 所示的 Move

Volumes 对话框，输入要移动的方向和距离就可以实现体的移动。

对图元旋转的操作方式为执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Move/Modify→Transfer Coord 菜单命令，打开 Transfer Coord 子菜单，其中提供了对包括点、线、面、体、节点等图元对象旋转的命令。仍以体为例，执行 Volumes 命令，拾取要旋转的体，弹出图 4-47 所示的 Transfer Volumes 对话框。

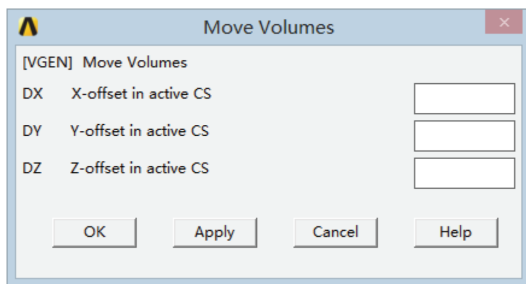


图 4-46 Move Volumes 对话框

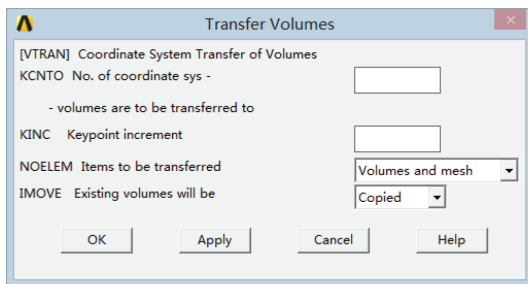


图 4-47 Transfer Volumes 对话框

从对话框看出，在进行旋转之前，需要事先定义一个局部坐标系，确定把体旋转到什么位置。除此之外，在对话框中还可以指定关键点的增量值，选择将体和划分后的单元一起进行旋转。

2. 复制

对图元复制的操作为执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy 菜单命令，打开 Copy 子菜单，其中提供了对包括点、线、面、体、节点等图元对象复制的命令。仍以体为例，执行 Volumes 命令，拾取要复制的体，弹出图 4-48 所示的 Copy Volumes 对话框。

在对话框中给定要复制的份数、复制的位置、关键点的增量值、复制的内容（是否带有网格），就可以实现复制。如果要实现在圆周上的复制，就要将坐标系变为柱坐标系，其余操作相同。

3. 镜像

对图元镜像的操作为执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Reflect 菜单命令，打开 Reflect 子菜单，其中提供了对包括点、线、面、体、节点等图元对象镜像的命令。仍以体为例，执行 Volumes 命令，拾取要镜像的体，弹出图 4-49 所示的 Reflect Volumes 对话框。

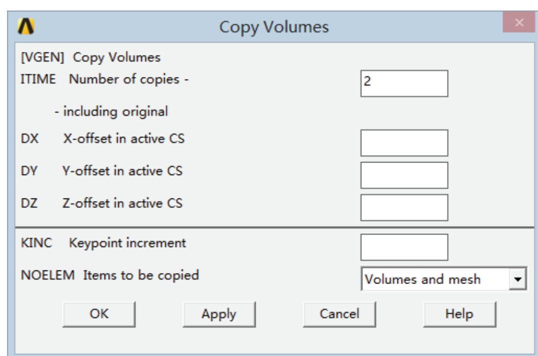


图 4-48 Copy Volumes 对话框

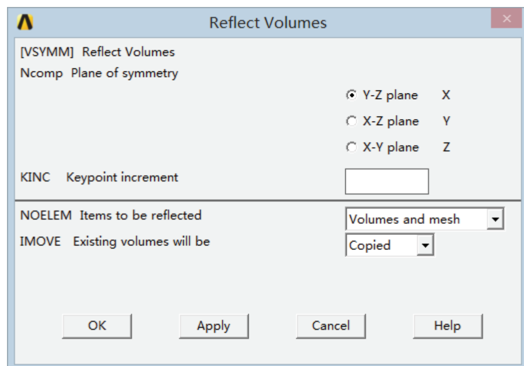


图 4-49 Reflect Volumes 对话框

在对话框内选择关于哪个面（或者沿哪个坐标轴）进行镜像、关键点的增量值、复制内容（是否带有网格）等，就可以实现镜像。

4．删除

对图元删除的操作为执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Delete 菜单命令，打开 Delete 子菜单，其中提供了对包括点、线、面、体、节点等图元对象进行删除的命令。选中要删除的内容，然后在图形窗口选中目标图元就可以实现删除。

需要注意的是，ANSYS 中的图元是要分等级的，如果选择删除“体”，那么删除之后虽然体不存在了，但是组成体的面、线、关键点还在；如果选择删除“体及以下图元”，那么操作之后，体及低于体的所有图元（即组成体的面、线、关键点）就都不存在了。

4.7 本章小结

本章详细介绍了几何模型的建立方式，包括基本图元的建立方式、通过拖拽的方式建立几何模型、图元的选取方法、图元的布尔操作以及其他操作，使读者掌握使用 ANSYS 进行几何模型的建立方法。

第 5 章 建立有限元模型

前面所建立的实体模型，并不能够进行有限元求解计算，节点和单元是采用有限元法求解问题的基本单位。因此，必须将实体模型进行网格划分得到节点和单元或者直接建立节点和单元才能够用于求解和计算。本章将详细介绍网格划分方法以及直接建立有限元模型的方法。

学习目标：

（1）了解网格划分的方法和步骤;

（2）掌握两种 ANSYS 划分网格方式;

（3）掌握 ANSYS 直接建立有限元模型的方法步骤。

5.1 网格划分方法和步骤

ANSYS 有限元网络划分是进行数值模拟分析至关重要的一步，它的好坏直接影响着后续计算结果的精确性。它需要先进行总体模型的规划，包括物理模型的构造、单元类型的选择、网格密度的确定等，应遵循先简单后复杂、先粗后精的原则。

5.1.1 网格划分方法

对模型的网格划分，一般采用自由网格和映射网格两种方式进行有限元分析。

自由网格对于单元形状没有限制，并且对几何模型没有特定的要求，但相对单元数目较多，分析时间长，精度低。

映射网格只能包含四边形或者三角形单元，映射体网格也只能包含六面体单元。它所生成的网格相互之间是规则排列的，分析的精度也比较高。但要求划分区域必须满足一定的拓扑条件，否则就不能进行映射网格的划分。对于复杂形状的边界，其模拟能力较自由网格差。

一般建议在非边界区域尽可能地采用映射网格，只有对于形状复杂的边界才采用自由网格。在计算精度条件不是很高且没有足够的时间的情况下，不妨采用自由划分网格的方式。

由于分析问题的复杂性，有限元网格划分很少一次性成功。最好在划分前先保存数据库，在条件和时间允许的情况下尽量多试一些网格划分方案，以求得到精度和计算代价的均衡。有限元网格划分方法一般可分为自由网格划分、扫掠网格划分、映射网格划分和混合网格划分等。

1．自由网格划分

自由网格划分方法对于单元形状没有限制，并且没有特定的准则。对于任何几何模型，不管规则的还是不规则的，都可以进行网格划分。该方法是自动化程度最高的网格划分技术

之一。

采用自由网格对面进行网格划分时，可以由四边形单元或者三角形单元组成，或者由两者混合组成。对几何体进行网格划分时，自由体网格一般为四面体单元。

在选择自由网格划分时，可利用 ANSYS 的命令人工设置网格的大小，这些命令包括 AESIZE、LESIZE、KESIZE、ESIZE 等；可以使用 SMARTSIZE 命令来自动控制网格的大小和疏密分布。

2．扫掠网格划分

扫掠网格划分方法从一边界面的网格扫掠贯穿整个没有划分单元的体模型来生成有限元模型。

如果复杂实体模型是采用 VDRAG、VROTAT、VOFFST、VEXT 等命令由面经过拖拽、旋转、偏移等方式生成的，则可先在原始面上生成壳单元形成网格，然后在生成体的同时自动形成三维实体网格。

如果复杂实体模型已经生成，则可用人工或全自动扫掠网格划分功能来划分网格。扫掠网格划分是一种非常好的方式，对于复杂实体模型，经过一些简单适当的切分处理，就可以自动形成规则的六面体网格。

3．映射网格划分

映射网格划分对单元形状有限制，而且必须满足特定的规则。映射网格面单元只包含四边形或三角形，体单元只包含六面体单元。映射网格具有规则的形状，明显成排的单元。

在 ANSYS 中，为了达到映射网格划分的这些要求，可将四边以上的多边形用 LCCAT 命令将某些边连成一条边，这样对于网格划分而言仍然是三角形或四边形，或者使用 AMAP 命令定义 3～4 个顶点来进行映射划分。

对于六面以上的多面体，用 ACCAT 命令或者 ANSYS 中的布尔运算将某些面切割再连成一个面。同样，对于映射网格划分而言，仍然是四面体、五面体或六面体。

4．混合网格划分

为了提高计算精度并减少计算时间，通常将以上几种网格划分方法混合使用。根据实体模型结构的特点，在划分网格时分别采用自由、映射、扫掠等多种网格划分方式，以形成综合效果较好的有限元模型。

在进行混合网格划分时要综合考虑时间、精度、建模工作量等几方因素。为了提高计算精度并减少计算时间，首先应考虑对适合扫掠和映射网格划分的区域划分六面体网格，如果无合适的区域，应尽量通过切分等多种布尔运算方法来创建合适的区域。

对无法再切分但必须用四面体自由网格划分的区域，采用带中节点的六面体单元进行自由网格划分，自动退化成适合自由网格形式的单元。此时，在该区域与已进行扫掠或映射网格划分的区域交界面上会自动形成金字塔过渡单元。

5.1.2 网格化的一般步骤

有限元网格的划分过程主要包含 3 个步骤：设置单元属性、设置网格控制和划分网格。

1．设置单元属性

单元属性包括单元的类型（TYPE）、单元的实常数（Rl）、单元的材料性质（MP）及单元形成时所在的坐标系。

当对对象进行网格划分时，要明确单元的属性是什么。用户可以设置不同种类的单元，相同的单元又可设置不同的实常数，也可设置不同的材料属性以及单元坐标系。

2．设置网格控制

对网格控制的设置，即对网格划分参数的设置，最主要的是定义对象边界单元的大小和数目。网格设置的参数将直接决定网格的大小、形状和数目。这一步非常重要，将影响分析时的正确性和经济性。

网格划分得较细会得到很好的计算结果，但并非网格划分得越细，得到的结果就越好，因为网格划分得太密会占用大量的分析时间。一般而言，随着网格密度的增加，计算精度提高，同时计算时间增长，但当密度达到一定程度之后，计算精度增加很少，计算时间却按指数骤增。因此，要在计算精度和计算经济性之间找到合适的平衡点。

3．划分网格

完成前两步后即可进行网格划分，如果对于所划网格不满意，可以清除网格，重新定义单元属性和单元参数，再进行网格划分，直到得到满意的网格为止。

如前所述，实体模型的网格划分方法有多种，应根据求解问题的实际情况，选择合理的网格划分方案，以期获得较高的计算精度和较低的计算时间。

5.2　MeshTool 工具

在 ANSYS 程序前处理器当中，有强大的划分网格模块（MeshTool），用户可以通过该功能快速有效地将几何模型转化为物理模型（单元）。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 菜单命令，打开图 5-1 所示的 MeshTool 工具栏。

1．Element Attributes

在 Element Attributes 选项组中可以为几何实体设置单元属性，可以选择的几何实体有 Global、Volumes、Areas、Lines、Keypoints 4 种。设置完几何实体的单元属性之后，程序就会按照该单元属性来划分以后选定的几何实体。

单击 Set 按钮，弹出图 5-2 所示的单元属性设置对话框，其中可以设置的单元属性有单元类型号（Element type number）、材料号（Material number）、实常数（Real constant set number）、单元坐标号（Element coordinate sys）等。

2．Smart Size

选中该复选框，将会激活 ANSYS 程序中的智能网格划分功能 SmartSizing，该功能是 ANSYS 程序自动划分网格部分的一种工作方式。

在自动划分网格时，一般要求人工给出一些网格划分参数，如网格密度、单元最小角度、单元疏密过渡的梯度等。但是，ANSYS 程序按照网格划分的不同精度要求也设置了几组默认的参数，分别从 Fine 到 Coarse 排列了 1～6 级，1 级是最精确的，6 级是最粗糙的。

用户选中 Smart Size 复选框后，然后用鼠标选出一个精度值，程序就会根据数值找出程序默认的一组参数，ANSYS 程序按照该组参数自动进行网格划分，一般情况下都可以得到比较好的网格形状。

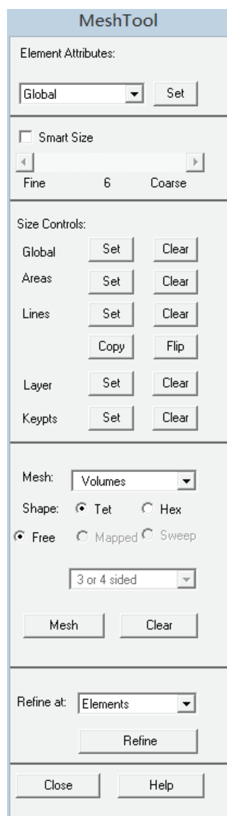


图 5-1　MeshTool 工具栏

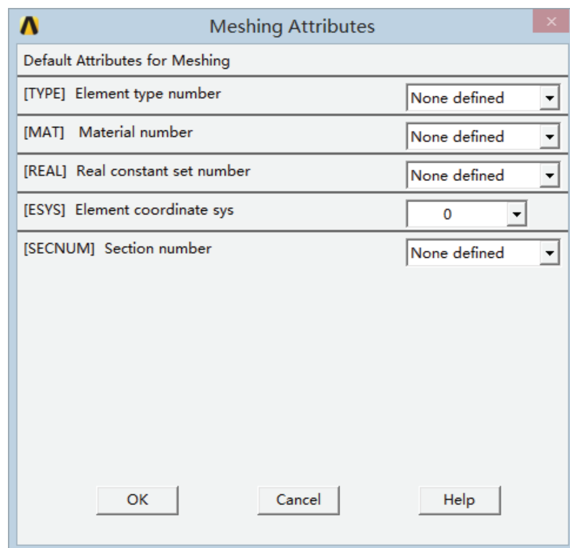


图 5-2　Meshing Attributes 对话框

3．Size Controls

当用户关闭 Smart Size 功能时，就要使用 Size Controls 选项组来设置网格划分的参数。Global 用于设置全局的单元数量或者单元边长。单击 Set 按钮，弹出图 5-3 所示的 Global Element Sizes 对话框，要求用户设置单元数量或者单元边长，但是不能两个参数同时输入。如果想清除当前的设置，单击 Set 按钮右边的 Clear 按钮即可。

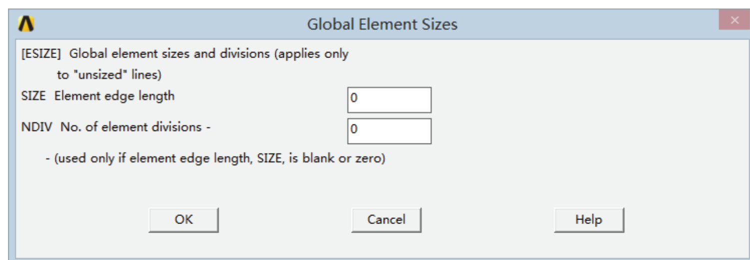


图 5-3　Global Element Sizes 对话框

Areas 用于设置面上的单元数量或者单元边长，Lines 用于设置线上的单元数量或者单元边长。单击相应的 Set 按钮，用鼠标在绘图区域选定将要设置单元数量或者单元边长的面或线，单击 OK 按钮或者 Apply 按钮，在弹出的对话框中输入单元数量或者边长。

需要指出的是，对于一条线上划分的单元数量进行设置以后，可以将这条线上设置的单元参数复制到另一条线上，不必再对另一条线进行重复的设置。操作过程如下：

（1）单击 Copy 按钮，用鼠标在绘图区域拾取一条已经设定单元参数的线，单击 OK 按钮。

（2）用鼠标在绘图区域选定没有设置单元参数的线，再次单击 OK 按钮。

如此便将已经设置的单元参数复制到没有设置单元参数的线上。大多数情况下，在一条线上设置的单元数都是均匀分布的，如果一条线上设置的单元数量是非均匀的，则可以使用 Flip 按钮将非均匀分布的单元进行对调。

Layer 用于设置从区域边界到区域内部边界单元大小的过渡因子。单击 Set 按钮，在绘图区域拾取将要设置过渡因子的边界线，单击对话框的 OK 按钮完成设置。在自动划分网格时，沿着设置了过渡因子的边界线的垂直方向，如果存在多层单元，相邻两层单元的大小将会受到过渡因子的影响。

Keypts 是定义所选关键点单元尺寸。操作过程与 Areas、Lines 的操作过程相似。

4．Mesh

Mesh 下拉列表框用于设置要进行网格划分的几何实体的类型，显然，在这里选择的类型必须与绘图区的几何实体类型一致。它所提供的几何实体类型有 Volumes、Areas、Lines、Keypoints 4 种，对应的单元形状（Shape）有 Tet、Hex 以及 Free、Mapped、Sweep 几种。

至此，用户单击 Mesh 按钮，拾取要进行网格划分的几何模型，程序就会按照用户所给出的参数来进行网格划分。如果对于所划分网格不满意，可以单击 Clear 按钮，拾取不满意网格的划分体，清除网格，重新进行网格划分。或者单击 Refine 按钮，对所划分网格不够精细的部分进行选择性地重新绘制。

5.3 Meshing 子菜单

除 MeshTool 外，Meshing 子菜单具有更完整的网格划分功能。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing 菜单命令，打开 Meshing 子菜单，如图 5-4 所示。



图 5-4　Meshing 子菜单

1．Mesh Attributes

与 MeshTool 的 Element Attributes 选项组类似，Meshing 子菜单中的 Mesh Attributes 命令用于为几何实体设置单元属性，包括总体默认的单元属性（Default Attributes）、Volumes、

Areas、Lines、Keypoints 等，可以设置整体，也可以单独选出一部分进行设置。

可以设置的单元类型也与 MeshTool 工具栏中的 Element Attributes 选项组相同，包括单元类型号、材料号、实常数、单元坐标系号等。

2．Size Cntrls

该命令下包含 SmartSize 和 ManualSize 两项。

（1）SmartSize。

SmartSize 命令下面的一些设置，允许用户自己改变。其中 Basic 和 Adv Opts 分别是对单元的疏密程度、网格的过渡因子等一些常数进行控制的选项。前者只是确定了单元疏密程度的等级（1～10 级），后者比较详细具体。其 Advanced SmartSize Settings 对话框如图 5-5 所示。

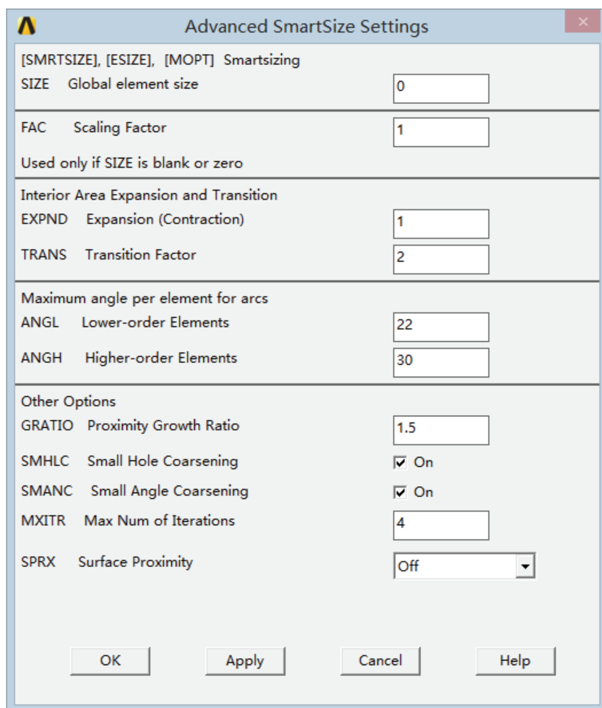


图 5-5　Advanced SmartSize Settings 对话框

1）SIZE：控制网格划分的单元尺寸或者疏密。有 1～10 级共 10 个等级，与 Basic 中的一样。

2）FAC：计算默认的网格大小时使用的比例因子。对于 h-单元来说，该因子取值范围是 0.2～5，默认为 1.0，对应的单元密度等级 SIZE 是 6。

3）EXPND：网格的膨胀因子，但也可以说是收缩因子。在网格划分时，区域内部的单元可以与边界上的单元大小不同。如果膨胀因子为 1，则区域内部的单元大小与边界上的单元大小相同；如果膨胀因子小于 1，区域内部的单元就会小于边界上的单元；如果膨胀因子大于 1，区域内部的单元就会大于边界上的单元。其取值范围是 0.5~4，默认值为 1。

4）TRANS：网格过渡因子，标识着区域边界和区域内部单元密度变化的梯度。对于 h-

单元来说，默认为 2.0，对应的单元密度等级 SIZE 是 6。它允许区域内部的单元比相邻边界上的单元大一倍。最佳取值范围是 1～4。当然，区域内部单元的最终大小还与网格的膨胀因子有关。

5）ANGL：曲线边界上每个低阶单元的最大跨距角。默认为 30°，单元密度等级 SIZE 是 6，同样，该参数只对 h-单元有效。

6）ANGH：曲线边界上每个高阶单元的最大跨距角。默认为 30°，单元密度等级 SIZE 是 6，同样，该参数只对 h-单元有效。

7）GRATIO：搜索网格划分区域时常用的搜索步长因子。对于 h-单元来说，该因子取值范围是 1.2~5，默认为 1.5，对应的单元密度等级 SIZE 是 6。

8）SMHLC：粗略绘制小孔的开关，可以是 ON 或者 OFF。如果是 ON，程序就不会细化划分区域中的小孔周围部分；如果是 OFF，程序就会细化划分区域中的小孔周围部分。

9）SMANC：粗略绘制尖角的开关，可以是 ON 或者 OFF。如果是 ON，程序就不会细化划分区域中的尖角周围部分；如果是 OFF，程序就会细化划分区域中的尖角周围部分。

10）MXITR：网格划分时候的最大迭代次数，默认为 4。

11）SPRX：细化表面的开关，以便单元更加精确地模拟结构表面形状。若取值为 0，ANSYS 程序就不进行表面细化；若取值为 1，ANSYS 程序进行表面细化，壳体单元也要进行一些修正；若取值为 2，ANSYS 程序进行表面细化，壳体单元不进行修正。

在 SmartSize 的下拉菜单里，还有一个 Status，它是以文本窗口的形式给出上面所介绍的各个参数的具体数值。

（2）ManualSize。

在 Smart Size 功能关闭时，ANSYS 程序将会使用 Manualsize 菜单，如图 5-6 所示，通常是在 Smart Size 划分网格效果不是很好的情况下使用该功能。

其中 Global 命令用来设置全局网格尺寸，对于没有专门设置网格参数的区域均使用该设置参数；Areas 命令定义自动网格划分时与面积有关的参数；Lines 命令用来定义自动网格划分时与边界曲线有关的参数；Keypoints 命令用来定义自动网格划分时与关键点有关的参数 Layers 命令用来定义自动网格划分时与过渡区有关的参数。

限于篇幅，这里仅对 Global 命令作简单介绍，其子菜单如图 5-7 所示。



图 5-6 ManualSize 子菜单



图 5-7 ManualSize 下的 Global 子菜单

1）Size：对指定划分区域边界上的单元定义单元边长或者单元个数，两者只能定义一个。

2）Area Cntrls：定义二维面型的区域单元划分参数，包括单元膨胀因子、区域内部的单元边长和网格过渡因子 3 项。

3）VoluCntrls：对三维体型的区域单元划分参数（单元膨胀因子）进行定义。

4）Other：对于其他不是面型、体型和全局型的几何实体区域的网格划分定义参数。

3．Mesher Opts

执行该命令将弹出 Mesher Options 对话框，如图 5-8 所示。

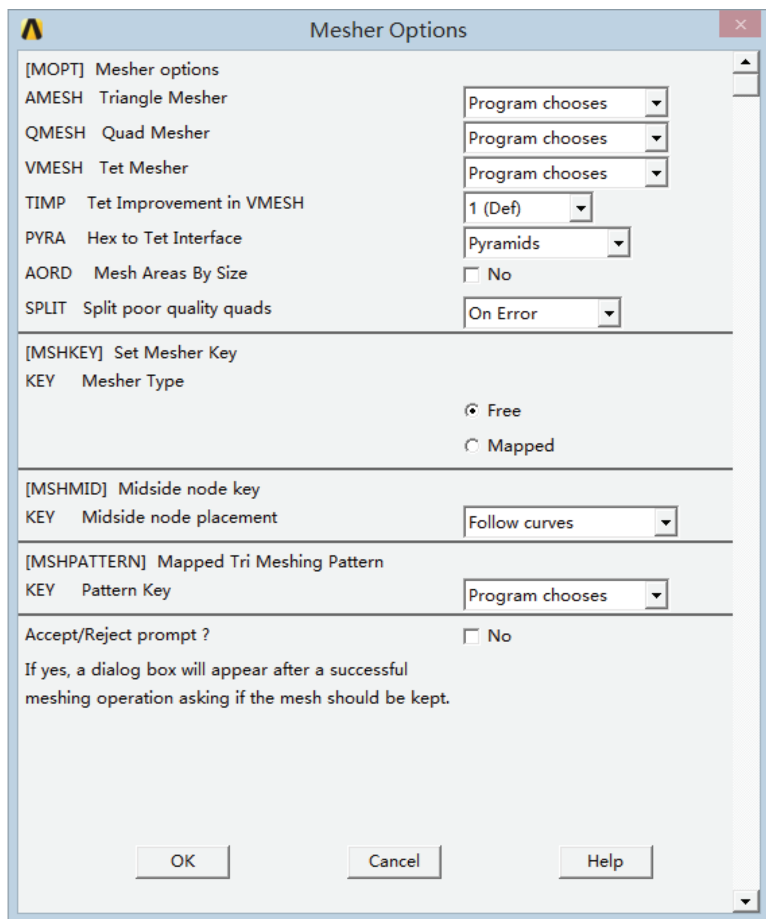


图 5-8 Mesher Options 对话框

ANSYS 程序提供了几种不同的网格划分器，根据几何模型在形状上的不同特点选择不同的网格划分器可以得到比较好的效果。

（1）AMESH。

三角形面网格划分选项，ANSYS 提供了以下 4 个可用选项。

1）DEFAULT。默认方式，由 ANSYS 程序选定使用哪一种网格划分器。在大多数情况下，ANSYS 将选用主三角形网格划分器（黎曼空间网格划分器）。无论由于什么原因，如果 ANSYS 程序所选用的网格划分器网格划分失败，程序将自动采用另外一种网格划分器再一次进行网格划分。

2）MAIN。使用主三角形网格划分器（黎曼空间网格划分器）划分所有面。如果网格划分失败，它不会激活其他备用网格划分器。该网格划分器适用于大部分的面。

3）ALTERNATE。使用第一备用的网格划分器（三维三角形网格划分器）划分所有的

面，当这种网格划分器划分网格失败时，不会激活另一种网格划分器。由于网格划分速度比较慢，一般不推荐使用。在对含有退化几何形状（例如球面、锥面）的表面进行网格划分时，该网格划分器所得网格质量比较好。

4）ALT2。ANSYS 使用第二备用的网格划分器（二维参数化网格划分器），当这种网格划分器划分网格失败时，不会激活另一种网格划分器。在对含有退化几何形状（例如球面、锥面）的表面进行网格划分时，所得网格质量比较差，建议避免在这种情况下采用主三角形网格划分器。

（2）QMESH。

四边形面网格划分选项，ANSYS 提供了以下 3 个可用选项。

1）DEFAULT。默认方式，由 ANSYS 程序选定使用哪一种网格划分器。在大多数情况下，ANSYS 将选用主四边形网格划分器（Q-Morph 网格划分器）。对于比较粗糙的网格，ANSYS 可能选用备用四边形网格划分器。在大多数情况下，使用 Q-Morph 网格划分器将得到质量比较好的单元。无论由于什么原因，如果 ANSYS 程序所选用的网格划分器网格划分失败，程序将自动采用另外一种网格划分器再一次进行网格划分。

2）MAIN。使用主四边形网格划分器（Q-Morph 网格划分器）划分所有面。如果网格划分失败，它不会激活其他备用网格划分器。

3）ALTERNATE。使用备用的网格划分器，当这种网格划分器划分网格失败时，不会激活 Q-Morph 网格划分器。当使用该网格划分器时，AMESH 项必须选中 ALTERNATE 或者 ALT2。

（3）VMESH。

四面体网格划分选项，ANSYS 提供了以下 3 个可用选项。

1）DEFAULT。默认方式，由 ANSYS 程序选定使用哪一种网格划分器。在大多数情况下，对于 p-单元的网格划分，ANSYS 选用四面体备用网格划分器，其他单元则使用主四面体网格划分器。

2）MAIN。使用主四面体网格划分器进行网格划分。对与大多数模型而言，该网格划分器明显比备用网格划分器速度快。

3）ALTERNATE。使用备用四面体网格划分器（波前网格划分器）。

（4）TIMP。

确定是否改善四面体单元的网格质量。通过自由网格划分方法直接得到的四面体单元质量一般情况会不大好，需要进一步改善。程序提供了一组数字，表明改善单元的程度。

（5）PYRA。

设置是否在四面体单元和六面体单元之间创建五面体单元来过渡一下。

（6）Set Mesher Key。

网格划分器使用的划分方法。根据模型的形状特点，可以使用自由划分网格方法，也可以使用映射网格划分方法。

（7）Midside node key

设置单元边长上的中节点的位置。可以让中节点在模型的曲线或者曲边上或者在单元的直边上或者平面边界上，也可以取消中节点。

（8）Mapped Tri Meshing Pattern

设置映射三角形网格划分的方式。程序提供了 3 个选项：第一种，由程序确定，这时程序会尽可能增大单元最小的角；第二种，程序沿着 I 节点单向的部分；第三种，程序沿着 J 节点单向的部分。

（9）Accept/Reject prompt?

设置在每一次网格划分成功以后是否产生一个对话框，该对话框询问是否接受得到的网格划分。默认情况下不弹出这个对话框，即接受网格划分。如果不接受，可以直接进行下一次网格划分，不必删除已经得到的网格。

4．Concatenate

在该子菜单下，有 Lines、Areas 和 Del Concats3 条命令。

（1）Lines

为了实现映射网格划分而将多条相邻的线合并成为一条线。对于映射网格划分方法，要求划分区域满足一定的条件，因此要将多余的边进行合并。

合并得到的线只是为了映射网格划分，与使用布尔操作中的 ADD 命令得到的线性质不同，不能将这样的线作为一个整体施加边界条件和网格划分参数。

（2）Areas

为了实现映射网格划分而将多个相邻的面合并成为一个面。对于映射网格划分方法，要求划分空间区域满足一定的条件，因此要将多余的面进行合并。

同样，合并得到的面只是为了映射网格划分，与使用布尔操作中的 ADD 命令得到的面性质不同，不能将这样的线作为一个整体施加边界条件和网格划分参数。

（3）Del Concats

该命令用于对于以上所建立的线和面进行删除。

5．Mesh

打开 Mesh 子菜单，如图 5-9 所示。

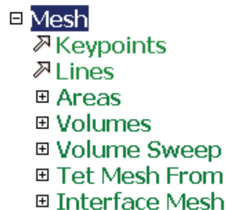


图 5-9　Mesh 子菜单

（1）Keypoints：在关键点上生成节点和点单元。

（2）Lines：在指定的线上生成节点和线单元。

（3）Areas：在指定的面上生成网格，包括映射网格划分和自由网格划分。

1）映射网格划分。

对面进行映射网格划分，需要待划分面满足条件：面为三边形或者四边形；面的对边必须划分为相同数目的单元，或其划分与一个过渡形网格的划分相匹配；如果面是三边形，则划分的单元必须是偶数且各边单元数相等。

对面映射网格的划分，可以选用 3～4 个定点来进行映射网格划分（By Corners），选择面的边来进行映射网格划分三边或四边，或者采用 Concatenate 命令将线连接以满足三边形或四边形的条件再进行映射网格的划分。

2）自由网格划分。

自由网格划分比较简单，对面的形状等没有要求，只须选中要进行网格划分的面即可。

（4）Volumes：对选定的体进行网格划分，也包括映射网格划分和自由网格划分两种。

1）映射网格划分。

对体进行映射网格划分，需要待划分体必须满足条件：外形应为 6 个面、5 个面、4 个面；对应边上必须划分相同的单元数，或分割符合过渡网格形式以适于六面体网格的划分；如果是五面体、四面体，则三角形面上的单元分割数必须是偶数。

对体映射网格划分，为选中体上的 4～6 个面，或者通过 Concatenate 命令将面连接以满足 6 个面、5 个面、4 个面的要求，继而进行映射网格的划分。

2）自由网格划分。

自由网格划分比较简单，对体的形状等没有要求，只须选中要进行网格划分的体即可。

（5）Volume Sweep：采用扫掠的方式对体划分网格。

执行 Volume Sweep 子菜单中的 Sweep Opts 命令，弹出图 5-10 所示的 Sweep Options 对话框，用户可以对扫掠网格划分的选项进行设置。比较常用的一项即对扫掠源面和目标面的选择控制，如果选中 Auto select source and target areas 复选框，则选中要进行网格划分的体，程序会自动选择源面和目标面；否则，选中要进行网格划分的体之后，须人工选取扫掠源面和目标面。

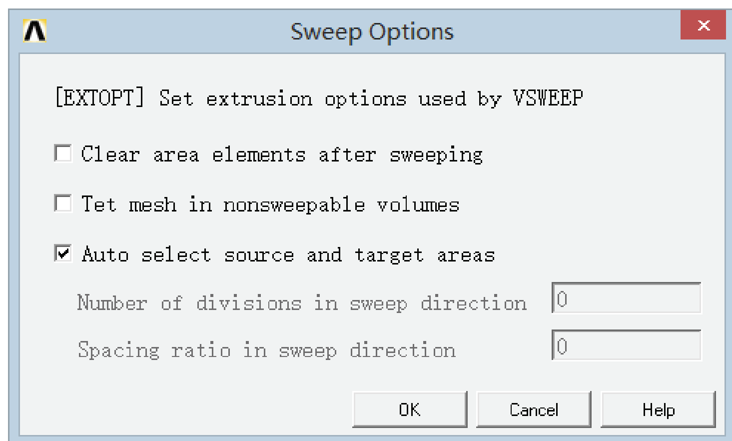


图 5-10　Sweep Options 对话框

单击子菜单中的 Sweep 选项，弹出体拾取对话框，拾取体进行扫掠网格划分。

（6）Tet Mesh From→Area Elements：在由面单元围成的一个封闭区域生成一个四面体单元。

（7）Interface Mesh：用于界面网格的划分。

6. Modify Mesh

改进现有网格的质量，以获得能够满足分析要求的有限元模型，包括在节点处细化网格、单元细化网格、关键点细化网格、线细化网格和面细化网格等（Refine At），以及程序改进单元的边界以获得较好的单元质量（Improve Tets）。

7. Check Mesh

检查网格质量。在 Individual Elm 中有两个命令，一个是 Plot Bad Elements 命令，在绘图区域用特殊的颜色显示出质量不好的单元。网格质量与颜色的对应关系见表 5-1。

表 5-1　网格质量和颜色的对应关系

网 格 质 量	对 应 颜 色
质量较好的单元（Good Elems）	蓝（blue）
质量不好的单元（Warning Elems）	黄（yellow）
质量很差的单元（Bad Elems）	红（red）

另一个是 Select Warning/Error Elements 命令，选择警告或者有错误的单元，有两种可选的情况：警告和错误、错误。

8．Clear

如果对于所绘制的网格不满意，可以清除网格然后重新划分。该子菜单提供了对关键点、线、面和体的网格清除功能。

5.4　直接生成有限元模型

直接生成有限元模型的方法适合于较简单的实体模型的有限元分析问题实际上就是直接定义有限元模型中的节点和单元。

1．节点

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes 菜单命令，打开节点定义子菜单，主要的几种节点定义方法见表 5-2。

表 5-2　节点定义子菜单命令

菜 单 命 令	作　　用	命　　令
On Working Plane	弹出拾取对话框，在工作平面上拾取点建立节点	N
In Active CS	在当前激活坐标系中根据坐标值定义节点	N
At Curvature Ctr	在弧线的中心建立节点	CENTER
On Keypoint	在已知关键点上建立节点	NKPT
Fill between Nds	在已知两节点间建立一系列的节点	FILL
Quadratic Fill	由 3 个节点建立一系列的节点，3 个节点决定曲线的形状，新建立的节点填充于曲线上	QUAD

2．单元

由节点直接生成单元，首先必须已经定义该单元所需的最少节点，如果该单元是四边形单元，就必须先定义好 4 个节点。其次，必须已经指定合适的单元属性，在生成单元以前，必须先设置好对应的物理属性，如单元类型、单元实常数和材料属性等。

（1）定义单元属性。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Element Attributes 菜单命令，弹出图 5-11 所示的对话框。在该对话框定义将要建立的单元的属性，包括单元类型、实常数、材料属性、坐标系等。完成单元属性的定义后，下一步建立的单元将被赋予该属性。



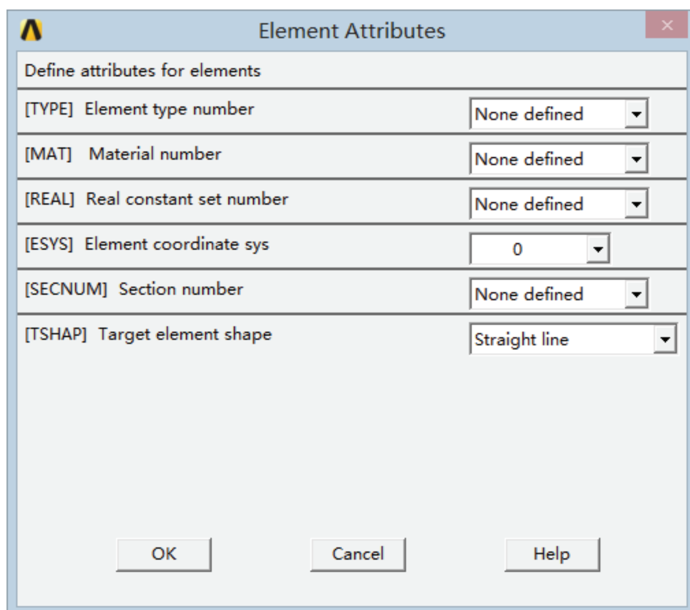


图 5-11 Element Attributes 对话框

（2）定义单元。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes 菜单命令，拾取要建立单元的节点，完成单元的创建。

另外，还有接触单元、表面效应单元以及超单元的创建，限于篇幅，在后文中根据需要作详细介绍。

5.5 本章小结

前处理的最终目的是建立有限元模型，可以通过几何模型的网格划分得到有限元模型和直接建立有限元模型两种方式创建。本章对几何模型的网格划分方法进行了详细的介绍，并简单介绍了直接建立有限元模型的方法。

第 6 章 施 加 载 荷



施加载荷是有限元分析的一个重要步骤，不同的分析类型几乎都是以载荷作为求解的先决条件，进而研究在给定载荷下系统的变化情况。本章主要对 ANSYS 的载荷类型和施加方式进行介绍。

学习目标：

（1）了解 ANSYS 载荷施加对象及载荷分类；

（2）掌握 ANSYS 载荷施加方法及注意事项。

6.1 载荷概述

ANSYS 有限元分析的目的就是查看在不同的载荷条件下，一个结构或者组件的反应情况。载荷包括边界条件和激励，可以施加在实体上，也可以施加于有限元模型。对于不同的分析类型，有不同的载荷种类。

6.1.1 载荷施加对象

载荷施加对象是指载荷作用的实体或者有限元模型。在 ANSYS 中，载荷可以施加在实体模型或者有限元模型上。实际上，最终的载荷都是施加在有限元模型上的，如果载荷施加在实体模型上，则在求解过程中实体模型上的载荷自动转换为有限元模型上的载荷。

两种载荷施加对象的优缺点对比见表 6-1。

表 6-1 实体模型或者有限元模型上施加载荷的对比

类别	优 点	缺 点
实体模型	不依赖于有限元网格，可以在不改变载荷的情况下改变有限元网格划分。可以进行网格修改而不必重新施加载荷，使用简便	网格划分命令产生的单元处在当前激活的坐标系中，而节点位于全局坐标系中，使其有着和有限元模型不同的坐标系和载荷方向。载荷时间在主自由度上，不便于简化分析
有限元模型	将载荷直接施加在节点或者单元上，可以简单地选择全部所需的节点或单元，并指定适当的约定	任何有限元网格的修改都将使得先前施加的载荷无效，故需要删除先前的载荷并在新网格上重新施加载荷。由于网格划分生成数量较多的节点和单元，通过拾取操作来完成载荷加载的工作量很大

6.1.2 载荷分类

根据分析类型划分，载荷主要有以下几类。

（1）结构分析：位移、速度、加速度、力、压强、温度或者热应力、重力。

（2）热分析：温度、热流率、对流、内部热生成率、无限表面。

（3）磁场分析：磁势、磁流率、磁电流段、源电流密度、无限表面。

（4）电场分析：电势、电流、电荷、电荷密度、无限表面。

（5）声学分析：压强、位移。

所有的载荷类型如图 6-1 所示。

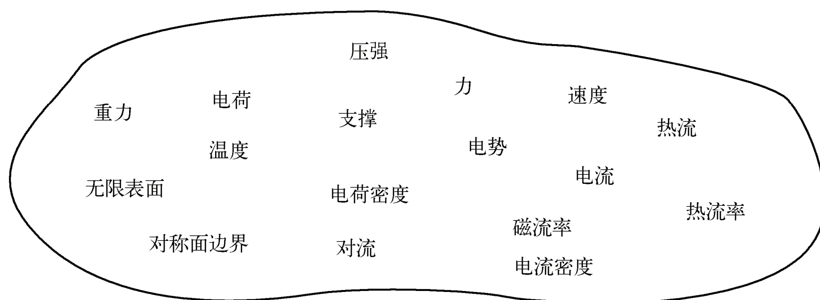


图 6-1 载荷示意图

根据施加方式的不同，载荷又分为以下几类。

（1）DOF 自由度：指定 DOF 数值，如结构分析中的位移和对称边界，热分析中的温度值。

（2）集中载荷：集中载荷施加在一个节点上，如结构分析中的力和动量，热分析中的热流率，磁场分析中的电流段。

（3）面载荷：将载荷施加在一个面上，如结构分析中的压强，热分析中的对流和热流密度。

（4）体载荷：体积或区域载荷，如结构分析中的温度，热分析中的热生成率，磁场分析中的电流密度。

（5）惯性载荷：体的内部惯性力，如结构分析中的重力加速度、角速度、角加速度等，主要用于结构分析。

（6）耦合场载荷：在耦合场分析中，由一个分析中得到的结果用于另外一个分析，例如可以将热场分析得到的温度分布结果用于结构分析中，磁场分析得到的磁场力用于结构场分析中。

6.1.3 载荷步、子步和平衡迭代

载荷步是指进行一次求解而施加的载荷组合，在线性或稳态分析中，可以使用不同的载荷步来施加不同的载荷组合。在瞬态分析中，不同载荷步代表不同时间段的载荷情况。

ANSYS 程序把在第一个载荷步选择的单元组用于随后的所有载荷步，而无论用户为随后的载荷步指定哪个单元组。

子步是为了更准确地分析而对一个载荷步的细分，在非线性分析等一些分析中，这是必需的。针对不同的分析类型，子步有着不同的作用：对于瞬态分析，使用子步是为了满足瞬态时间累积法则；对于非线性静态或者稳态分析，使用子步逐步增加载荷可以获得精确解。

平衡迭代是在给定子步下为了收敛而计算的附加解。平衡迭代仅应用于收敛起着重要作

用的非线性分析中的迭代修正。例如，在对二维非线性静态磁场进行有限元分析时，可通过使用两个载荷步获得精确解。第一个载荷步将载荷逐步增加到 5～10 个子步上，每个子步仅使用一个平衡迭代，第二个载荷步中得到最终的收敛解，并且只有一个使用 15～25 次平衡迭代的子步。相应的载荷步、子步和平衡迭代的关系如图 6-2 所示。

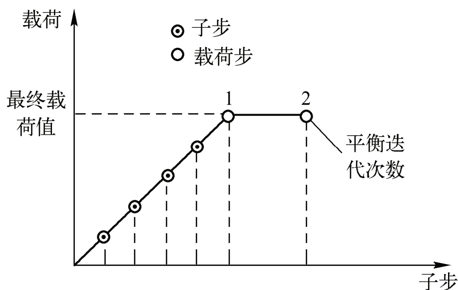


图 6-2　载荷步、子步和平衡迭代解析

6.1.4 时间参数

对于边界不随时间变化的稳态分析，一般而言，其边界条件的加载比较容易，但如果要施加随时间变化的载荷则会遇到一定的难度。加载这类载荷可以利用 ANSYS 提供的参数的函数定义功能。

执行 Utility Menu→Parameters→Functions→Define→Edit 菜单命令，定义一个通用的函数，并以文件的形式保存，然后在每一步施加载荷时让程序从给定的路径里读取该文件，并同时给定各特定常数的值。

在静态分析和瞬态分析中，无论分析是否依赖于时间，ANSYS 都使用时间作为跟踪参数。优点是时间总是单调增加的，并且在所有情况下可以使用一个不变的“计数器”或“跟踪器”，不需要依赖于分析的术语。

在指定载荷历程曲线的同时，在每个载荷步结束点使用 TIME 命令赋时间值。

6.2 载荷的施加和删除等操作

载荷的施加有多种方式，除了直接施加常数载荷之外，也可以利用表格和函数等来施加载荷。ANSYS 软件提供了多种函数加载功能，可以很方便地在模型表面施加函数变化的各种载荷。

对于施加于模型上面的载荷，用户可以进行修改和删除，同时还可以缩放载荷大小、实体模型载荷向有限元模型转移及删除载荷步文件等。

6.2.1 常数载荷的施加

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply 菜单命令，打开载荷施加子菜单，如图 6-3 所示。

1．结构分析

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural 菜单命令，打开结构载荷施加子菜单，如图 6-4 所示。

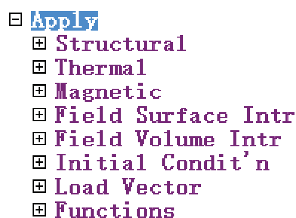


图 6-3　载荷施加子菜单

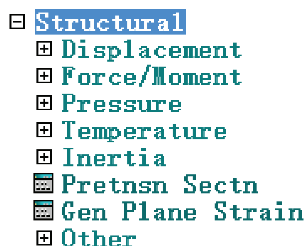


图 6-4　结构载荷施加子菜单

（1）位移（Displacement）。

执行 Displacement 命令，打开位移定义子菜单，可将位移载荷施加于节点、节点组件、关键点、线、面、对称边界和反对称边界条件。以线为例，单击 On Lines，弹出线拾取对话框，拾取要施加位移载荷的线，打开 Apply U, ROT on Lines 对话框，如图 6-5 所示。

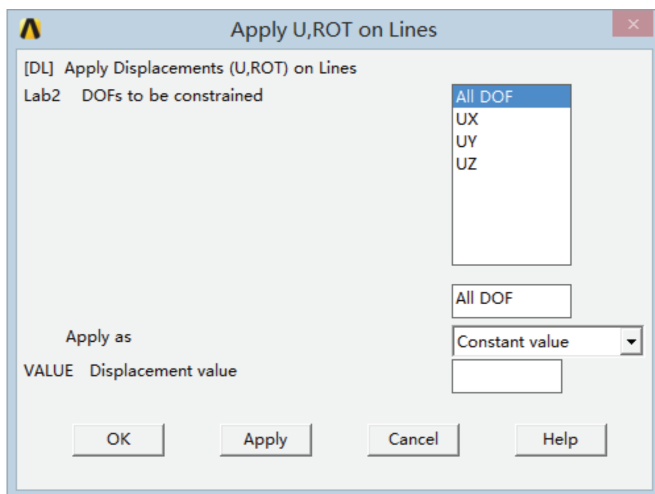


图 6-5　Apply U, ROT on Lines 对话框

在 Lab2 列表框选中位移的方向，Apply as 下拉列表框中选择 Constant value，确定定义实常数的位移载荷，VALUE 项设为要定义的位移值，单击 OK 按钮完成位移载荷的定义。

（2）力和动量（Force/Moment）。

选择 Force/Moment 选项，打开力和动量定义子菜单，可将力和动量载荷施加于节点、节点组件、关键点。以关键点为例，单击 On Keypoints，弹出关键点拾取对话框，拾取要施加载荷的线，打开 Apply F/M on KPs 对话框，如图 6-6 所示。

在 Lab 项选中力和动量施加的方向，在 Apply as 下拉列表框选择 Constant value，确定定义实常数的位移载荷，在 VALUE Force/moment value 项输入要定义的力和动量值，单击 OK 按钮完成定义。

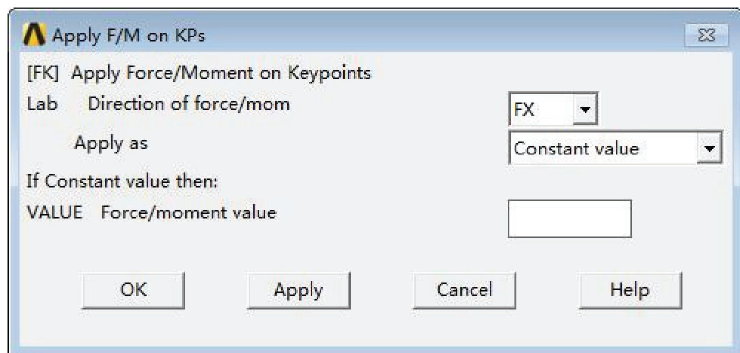


图 6-6 Apply F/M on KPs 对话框

（3）压强（Pressure）。

执行 Pressure 命令，打开压强定义子菜单，可将压强载荷施加于节点、节点组件、单元、单元组件、线、面。以线为例，单击 On Lines，弹出线拾取对话框，拾取要施加位移载荷的线，打开 Apply PRES on lines 对话框，如图 6-7 所示。选中 Constant value 项，VALUE 项为压强值。

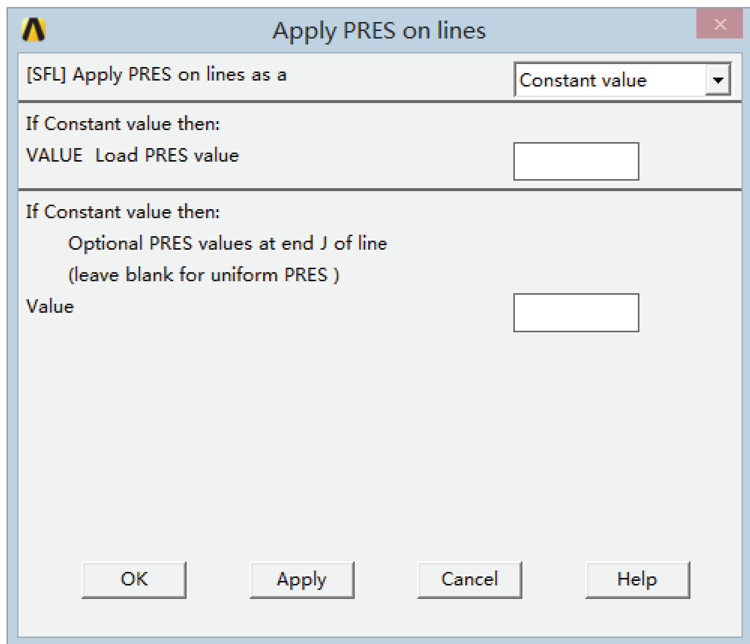


图 6-7 Apply PRES on lines 对话框

（4）温度（Temperature）。

执行 Temperature 命令，打开温度定义子菜单，可将温度载荷施加于节点、节点组件、单元、单元组件、关键点、线、面、体等。以线为例，单击 On Lines，弹出线拾取对话框，拾取要施加位移载荷的线，打开 Apply TEMP on Lines 对话框，如图 6-8 所示。选中 Constant value 项，VALUE 项为温度值。

（5）输入惯性力（Inertia）。

执行 Inertia 命令，打开惯性力定义子菜单，惯性力包括角速度、角加速度、科里奥利效应力、重力等。以重力为例，单击 Gravity→Global，打开 Apply（Gravitational）Acceleration 对话框，如图 6-9 所示。输入 3 个方向的重力加速。

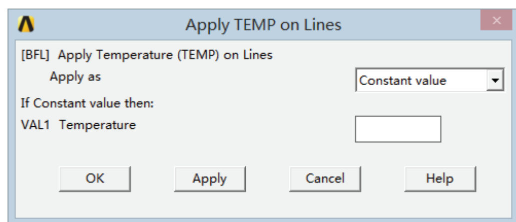


图 6-8　Apply TEMP on Lines 对话框

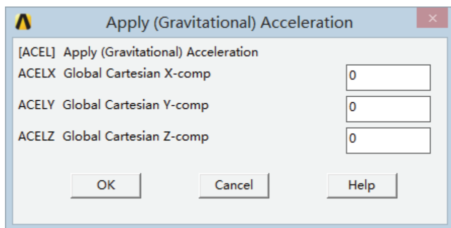


图 6-9　Apply（Gravitational）Acceleration 对话框

2．热场分析

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal，打开热场载荷施加子菜单，如图 6-10 所示。

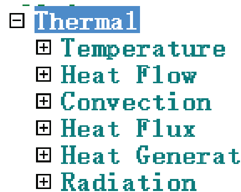


图 6-10　热场载荷施加子菜单

（1）温度（Temperature）。

执行 Temperature 命令，打开温度载荷定义子菜单，可将温度载荷施加于关键点、线、面和节点等。以线为例，单击 Lines，拾取要施加温度载荷的线，打开 Apply TEMP on Lines 对话框，如图 6-11 所示。

在 Lab2 列表框中选中 TEMP 项，在 Apply as 下拉列表框中选择 Constant value，确定定义实常数的温度载荷，VALUE 项为要定义的温度值，单击 OK 按钮完成温度载荷的定义。

（2）热流率（Heat Flow）。

执行 Heat Flow 命令，打开热流率载荷定义子菜单，可将温度载荷施加于关键点和节点。以节点为例，单击 On Nodes，拾取要施加温度载荷的节点，打开 Apply Heat on Nodes 对话框，如图 6-12 所示。

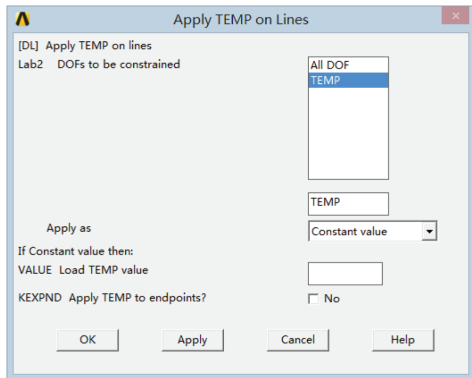


图 6-11　Apply TEMP on Lines 对话框

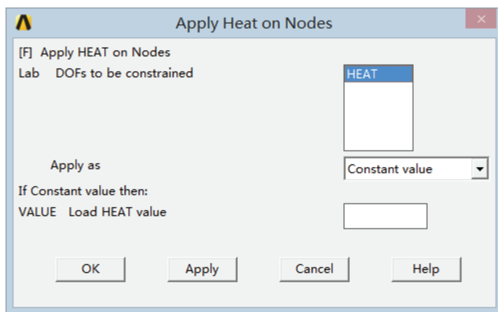


图 6-12　Apply Heat on Nodes 对话框

在 Lab 列表框中选中 HEAT 项，在 Apply as 下拉列表框中选择 Constant value，确定定义实常数的热流率载荷，VALUE 项为流入所选择节点的热流量，单击 OK 按钮完成热流率载荷的定义。

在定义热流率载荷过程中，如果选择了一系列节点，则所有节点的热流率值均为定义的热流率值。

（3）对流传热（Convection）。

执行 Convection 命令，打开对流换热定义子菜单，该项可施加于线、面、节点和单元。以线为例，单击 On Areas 拾取线，打开 Apply CONV on lines 对话框，如图 6-13 所示。

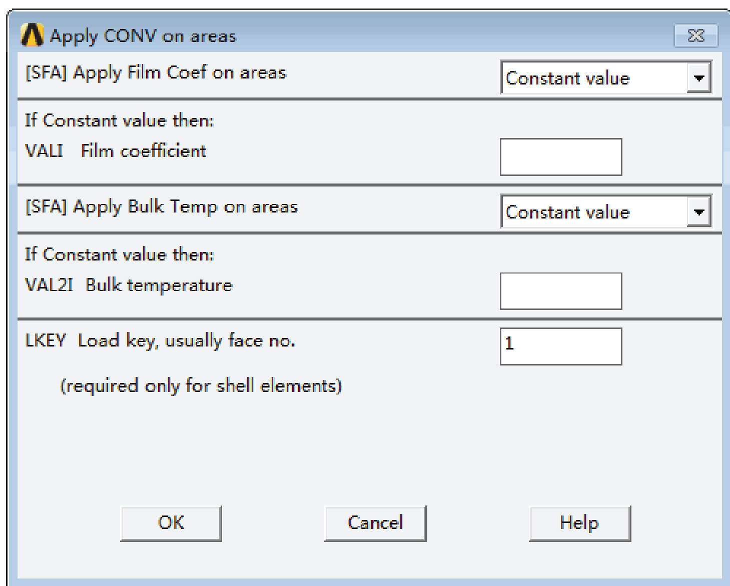


图 6-13 Apply CONV on areas 对话框

在[SFL] Apply Film Coef on line 项和 Apply Bulk Temp on line 项均选中 Constant value，VALI 项为对流换热系数值，VAL2I 项为环境温度值。单击 OK 按钮完成对流换热散热的定义。

定义随温度变化的对流换热系数时，可以采用表格或材料属性两种定义方式。以下简单介绍通过定义材料属性的方式定义随温度变化的对流换热系数的方法。

1）定义材料。定义 N 号材料，定义该材料随温度变化的对流换热系数属性（HF）值。

图 6-14 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，在右侧 Material Models Available 选项组中依次选择 Thermal→Convection or Film Coef.，弹出 Convection or Film Coefficient for Material Number 1 对话框，单击 Add Temperature 按钮，添加温度数据，输入不同温度下的对流换热系数值，如图 6-15 所示。其中，温度为壁面温度和环境温度的平均值。

2）定义对流换热载荷，在图 6-13 所示的 Apply CONV on line 对话框中，将 VALI 项设为“-N”。

单击 OK 按钮即完成随温度变化的对流换热系数的定义。

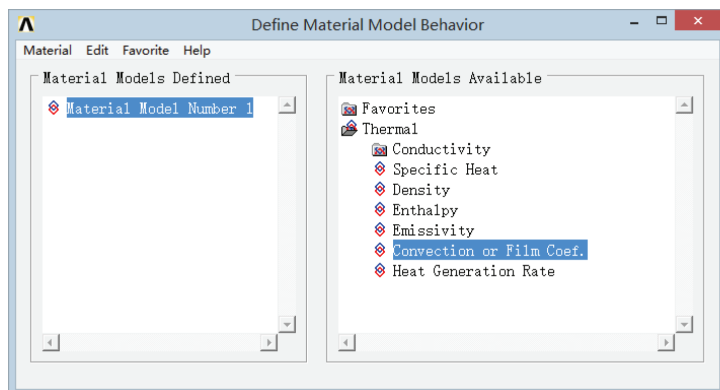


图 6-14　Define Material Model Behavior 对话框

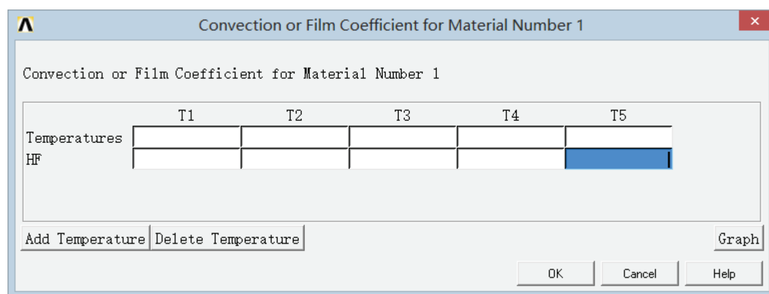


图 6-15　Convection or Film Coefficient for Material Number 1 对话框

（4）热流（Heat Flux）。

执行 Heat Flux 命令，打开热流定义子菜单，该项可施加于线、面、节点和单元。以面为例，单击 On Areas 拾取面，打开 Apply HFLUX on areas 对话框，如图 6-16 所示。

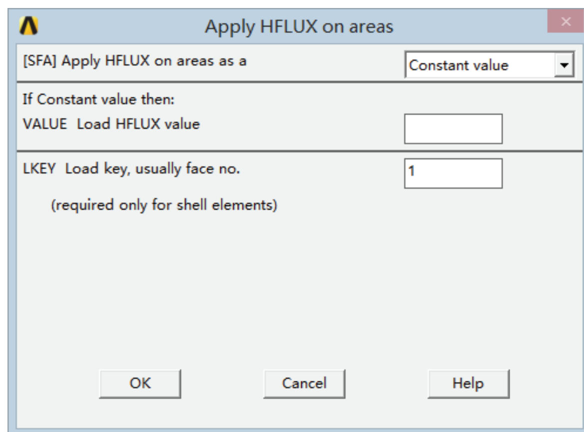


图 6-16　Apply HFLUX on areas 对话框

将 SFA 项设为 Constant value，VALUE 项为热流值，单位为单位面积的热流率，单击 OK 按钮完成热流的定义。

（5）热生成率（Heat Generat）。

执行 Heat Generat 命令，打开热生成率定义子菜单，该项可施加于线、面、体、关键点、节点和单元。以体为例，单击 On Volumes 拾取体，打开 Apply HGEN on volume 对话框，如图 6-17 所示。

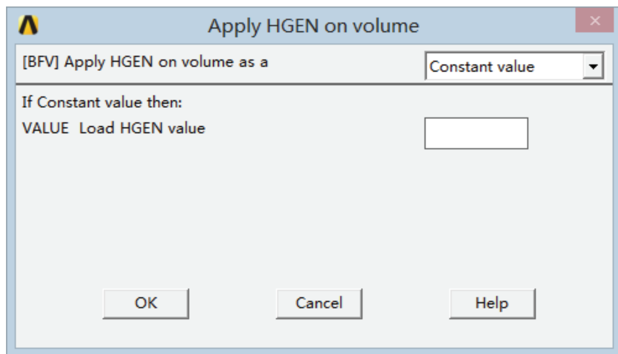


图 6-17　Apply HGEN on volume 对话框

将 BFV 项设为 Constant value，VALUE 项为热生成率，单位为单位体积的热生成率，单击 OK 按钮完成热生成率的定义。

（6）热辐射（Radiation）。

执行 Radiation 命令，打开热辐射定义子菜单，该项可施加于线、面、节点和单元。关于辐射的定义，将在后文中详细介绍。

3．电场分析

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Electric 菜单命令，打开电场载荷施加子菜单，如图 6-18 所示。

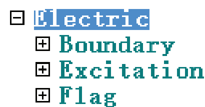


图 6-18　电场载荷施加子菜单

（1）电势值。

执行 Boundary→Voltage 命令，打开电势定义子菜单，可将电势值施加于关键点、线、面和节点等。以线为例，单击 Lines 拾取要施加电势值的线，打开 Apply VOLT on lines 对话框，如图 6-19 所示。将 DL 项设为 Constant value 并输入电势值。

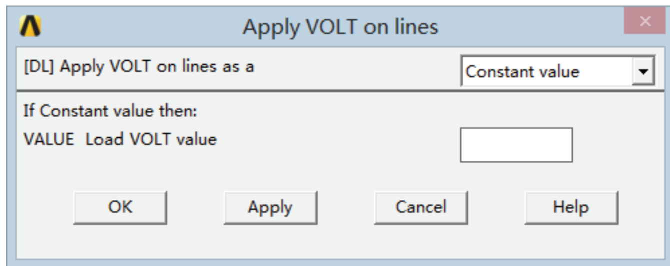


图 6-19　Apply VOLT on lines 对话框

（2）电流值。

执行 Boundary→Excitation 命令，打开电流定义子菜单，可将电流值施加于关键点和节

点等。以节点为例，单击 On Nodes 拾取要施加电流值的节点，打开 Apply AMPS on nodes 对话框，如图 6-20 所示。将 F 项设为 Constant value 并输入电流值。

4．磁场分析

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic 菜单命令，打开磁场载荷施加子菜单，如图 6-21 所示。

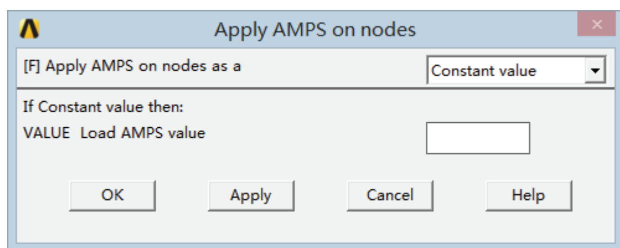


图 6-20 Apply AMPS on nodes 对话框

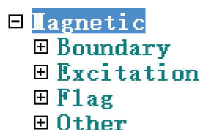


图 6-21 磁场载荷施加子菜单

（1）磁边界值（Boundary）。

执行 Boundary 命令，根据不同的分析类型显示不同的边界，包括磁势边界和温度等，可以施加于线、面、体、关键点和节点等。以线为例，单击 Lines 项拾取要施加磁势或温度的线，打开 Apply A on Lines 对话框（见图 6-22）或者 Apply TEMP on Lines 对话框（见图 6-23）

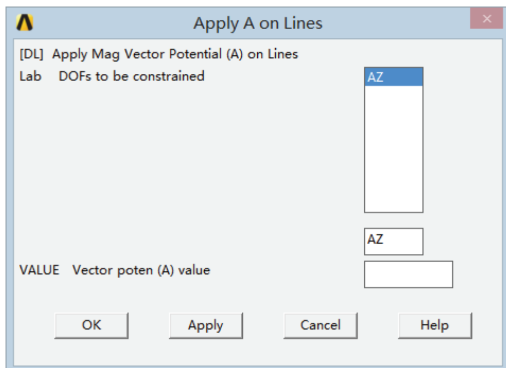


图 6-22 Apply A on Lines 对话框

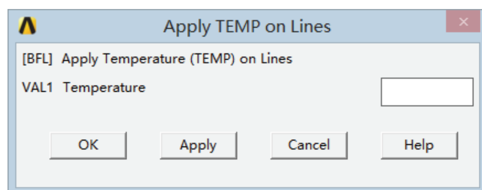


图 6-23 Apply TEMP on Lines 对话框

（2）磁激励源相（Excitation）。

执行 Excitation 命令，打开磁场激励源相子菜单，包括电流密度和电压降。以电流密度为例，可以施加于线、面、体、关键点、节点和单元。以面为例，单击 On Areas 拾取要施加的面，打开 Apply JS on Areas 对话框，如图 6-24 所示。

（3）标记边界（Flag）。

执行 Flag 命令，打开标记子菜单，包括组件单元标记和无限表面标记。组件单元标记单击 Comp.Force/Torque，打开 Apply Magnetic Force Boundary Conditions 对话框，如图 6-25 所示。无限面标记单击 Infinite Surf，选择要标记的线、面或者节点即可。

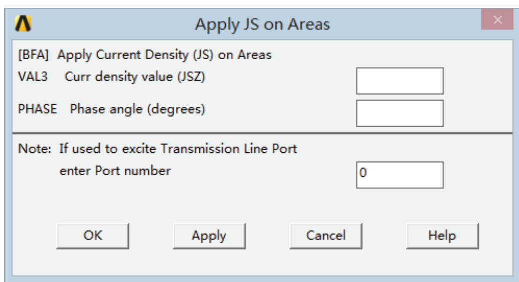


图 6-24 Apply JS on Areas 对话框

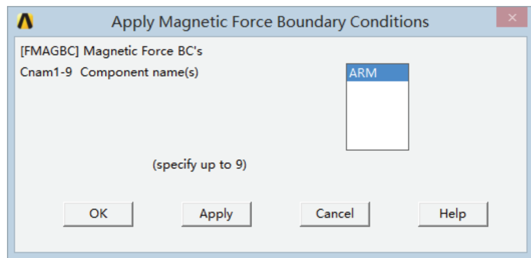


图 6-25 Apply Magnetic Force Boundary Conditions 对话框

6.2.2 利用表格和函数施加载荷

在实际的分析中，有时会遇到比较复杂的边界条件，如对模型所施加的载荷并非一个常数值，它随着坐标位置、时间或温度变化等。针对这种随坐标位置、时间或者温度变化的载荷，在 ANSYS 中可以通过表格或者函数来进行定义。

1．采用表格定义载荷

如果采用表格参数定义载荷，按如下步骤进行。

（1）用 TABLE 类型的数组参数定义载荷特性。例如，定义载荷与时间的关系。

（2）打开自动时间步长功能（AUTOTS,ON），定义时间步长（DELTIM）或子步数。

（3）定义时间步重置选项。可以选择在求解中不重置时间步，或基于一个已定义的时间（关键时间）数组重置时间步，或基于一个新的关键时间数组重置时间步。

具体操作为执行 Main Menu→Preprocessor→Load→Time/Frequenc→Time-Time Step 或 Main Menu→Preprocessor→Load→Time/Frequenc→Time and Substeps 菜单命令。

如果选用新数组并交互运行，此时程序要求填写一个 $n\times1$ 的关键时间数组。如果以批处理方式运行，则必须在执行命令之前定义一个数组，并将时间步重置为由 DELTIM 或 NSUBST 命令定义的初始值。

如果在应用时间步重置数组的同时又采用了另外的时间值数组，则须确认。如果 FREQ 数组的时间值比在 TSRES 数组中所对应的最接近的时间值大，则最大的数值至少应为由 DELTIM 或 NSUBST 命令定义的初始时间步增量。

定义关键时间数组的方式为执行 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define→Edit 菜单命令。

在关键时间数组中，时间值必须是升序排列的，并且不能超过由 TIME 命令定义的载荷步结束的时间。在求解过程中，时间步可能会在数组定义的关键时刻点被重置。

（4）用一个与关键时间数组类似的 $n\times1$ 数组参数来指定将哪些时刻的计算结果写入结果文件。用户可以利用关键时间数组，或用一个不同的数组。如果是交互式运行程序，可在此时创建数组或采用已有数组，具体操作为执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts-Output Ctrls→DB/Results File 菜单命令。

2．采用函数定义载荷

ANSYS 软件提供了函数加载功能，可以很方便地在模型表面施加函数变化的各种载荷。用户可以通过以下 3 种方法实现利用函数来施加载荷。

（1）使用 ANSYS 主菜单中的函数编辑器和加载器来实现，操作界面简单，方便查错和

调试。这种方法在实践中用得最多。

（2）通过参数的方法可以定义随时间变化的载荷。就方法的本质而言，方法（1）中用函数编辑器定义的函数文件，最终还是要使用函数加载器调入并定义成表参数供用户使用。

（3）使用 ANSYS 提供的 APDL 语言编程实现利用函数来施加载荷。这种方法需要用户对 APDL 语言的结构和编程非常熟悉。

6.2.3 多步载荷操作

若分析过程为多载荷步分析，则在每个载荷步加载完成后，需要确定该载荷步的终止时间，并将该载荷步写入载荷步文件中。具体操作过程如下。

（1）施加该载荷步的载荷。

（2）确定该载荷步结束时间。执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequence→Time&Time Step 菜单命令，弹出图 6-26 所示的 Time and Time Step Options 对话框。

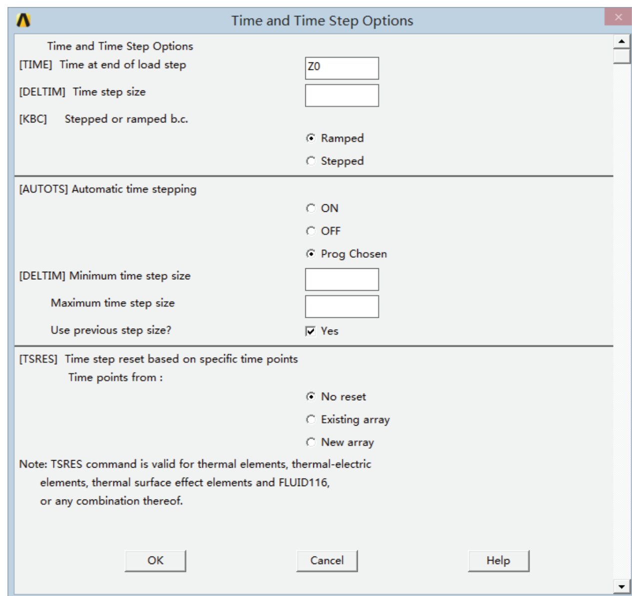


图 6-26　Time and Time Step Options 对话框

TIME 项为载荷步结束的时间，在该对话框中设置子步的相关选项，如时间步大小、载荷的施加方式（阶跃载荷或斜坡载荷），设置完成后单击 OK 按钮。

（3）写入载荷步文件。执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Write LS File 菜单命令，弹出图 6-27 所示的 Write Load Step File 对话框。

LSNUM 项为当前定义的载荷步的顺序编号，单击 OK 按钮，ANSYS 会在当前工作目录下创建文件名为 Jobname.S0n 的载荷步文件。

（4）重复前 3 个步骤，创建多载荷步文件。

在载荷步文件创建后，如果需要修改某一个载荷步选项或载荷，可以将此载荷文件读入，修改之后再重新写入，覆盖原载荷步文件。但是写入时指定的载荷步文件的顺序编号必须与原文件顺序编号相同。否则，其他载荷将被覆盖。

读取载荷步文件的方式为执行 Main Menu→Preprocessor→Loads-Read LS File 和 Main Menu→Solution→Read LS File 菜单命令，弹出图 6-28 所示的 Read Load Step File 对话框。

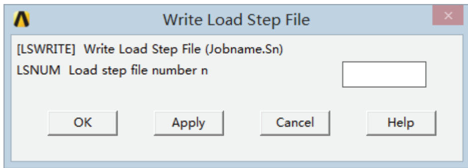


图 6-27 Write Load Step File 对话框

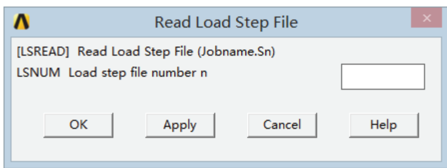


图 6-28 Read Load Step File 对话框

LSNUM 项为欲读取的载荷步文件的顺序编号，单击 OK 按钮，即可读入指定的载荷步文件。

6.2.4 删除载荷

施加载荷是 ANSYS 程序中比较重要的一步，如果载荷的施加位置不对，则可以删除该载荷，然后重新施加。针对这些问题，在 Main Menu→Preprocessor 和 Solution→Loads 子菜单中专门提供了一个子菜单，用于实现载荷的删除。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Delete 菜单命令，展开载荷删除子菜单，如图 6-29 所示。菜单中的各个命令及其功能见表 6-2。

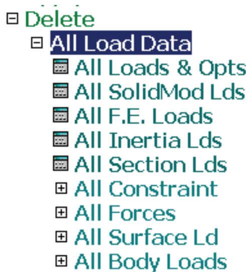


图 6-29 载荷删除子菜单

表 6-2 载荷删除子菜单命令

菜 单 命 令	功 能
All Loads&Opts	删除所有载荷
All SolidMod Lds	删除所有实体模型载荷
All F.E. Loads	删除所有有限元载荷
All Inertia Lds	删除所有惯量载荷
All Section Lds	删除所有部分载荷
All Constraint	选择性删除所有自由度约束
All Forces	选择性删除所有集中载荷
All Surface Ld	选择性删除所有面载荷
All Body Loads	选择性删除所有体载荷

要删除模型上的载荷，首先必须打开建立的分析模型才能打开删除载荷菜单中相应子菜单，否则子菜单不会出现。出现子菜单后，用户可以像施加载荷一样拾取要删除载荷的模型，如删除特点节点或者单元上的某种载荷。

6.2.5 其他操作

载荷的其他操作包括缩放载荷大小、实体模型载荷向有限元模型转移及删除载荷步文件等操作。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Operate 菜单命令，展开载荷操作子菜单，如图 6-30 所示。菜单中的各个命令及其功能见表 6-3。



图 6-30　载荷操作子菜单

表 6-3　载荷操作子菜单命令

菜 单 命 令	功　能
Scale FE Loads	缩放已施加的载荷大小
Transfer to FE	将施加在实体模型上的载荷转到相应的有限元模型上
Delete LS Files	删除载荷步文件

6.3 本章小结

本章详细介绍了载荷的施加对象和载荷分类，对求解过程中的载荷步、载荷子步和平衡迭代次数以及求解时间等概念进行了详细的描述。对载荷施加操作子菜单中各项命令的功能和操作方法进行了详细讲解，并介绍了利用表格和函数施加载荷以及多步载荷操作。



第 7 章　求 解 计 算

求解过程就是 ANSYS 读取有限元模型及其上的载荷信息，建立联立方程并使用不同的求解器得出求解结果的过程，求解结果包括基本解和派生解。本章主要对 ANSYS 的求解类型和求解过程进行介绍。

学习目标：

（1）掌握 ANSYS 的求解设置；

（2）掌握 ANSYS 的求解过程。

7.1　求解设置

在 ANSYS 程序中有几种求解器，包括稀疏矩阵直接解法、直接解法、雅可比共轭梯度法（JCG）、不完全乔类斯共轭梯度法（ICCG）、预条件共轭梯度法（PCG）、自动迭代法（ITER）等，可以采用执行 Main Menu→Solution→Sol’n Condition→Sol’n Option Tab 菜单命令命令或 EQSLV 实现对采用的求解器的选择。

在使用 ANSYS 进行分析时，一般用户通常可以不用关心求解器的选择，程序提供的默认求解器即可满足用户进行加载和求解的设置。

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type 菜单命令，展开分析类型设置子菜单，如图 7-1 所示，其各项命令的功能见表 7-1。



图 7-1　分析类型设置子菜单

表 7-1　分析类型及功能

命　　令	功　　能
New Analysis	为新的分析设置分析类型
Restart	重新启动分析过程
Sol'n Controls	求解控制选项

7.1.1　新分析

执行 Main Menu→Preference 菜单命令，打开分析类型选择控制对话框，如图 7-2 所示，选中要进行的分析类型，以热分析为例，选中 Thermal 复选框。执行 Main Menu→

Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，如图 7-3 所示。

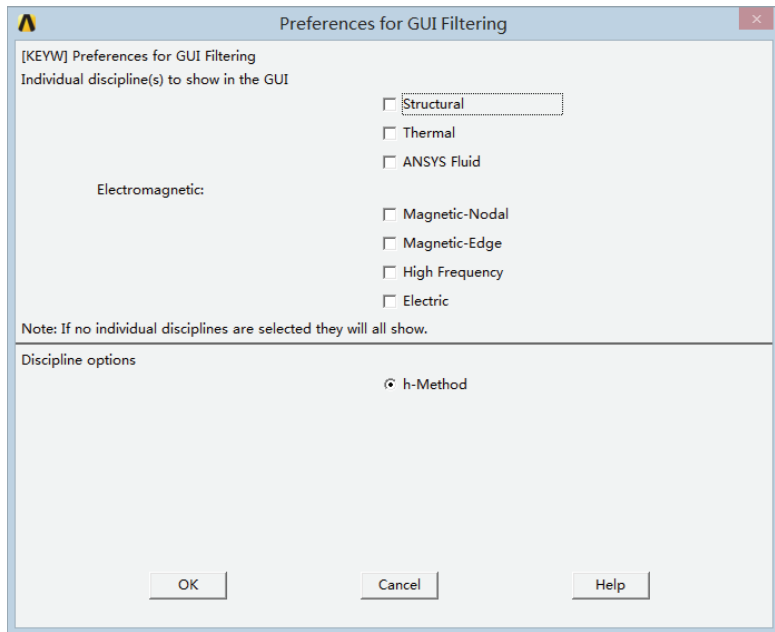


图 7-2 Preference for GUI Filtering 对话框

选择要进行的分析过程，稳态或瞬态分析。选定分析类型后，图 7-1 会根据选择的分析类型发生一定的变化。

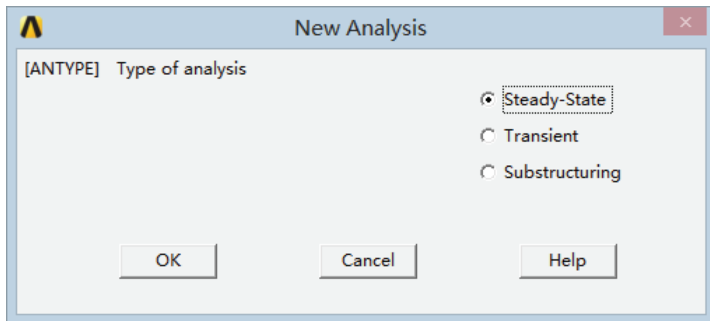


图 7-3 New Analysis 对话框

7.1.2 求解控制

ANSYS 会自动为不同的分析问题进行一些默认设置，基本满足一般的求解需求。但对于一些高级或复杂的分析问题，为了提高效率，需要用户指定求解方法、设置载荷步和时间等。

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 菜单命令，弹出图 7-4 所示的 Solution Controls 对话框。其各个选项卡的功能见表 7-2。

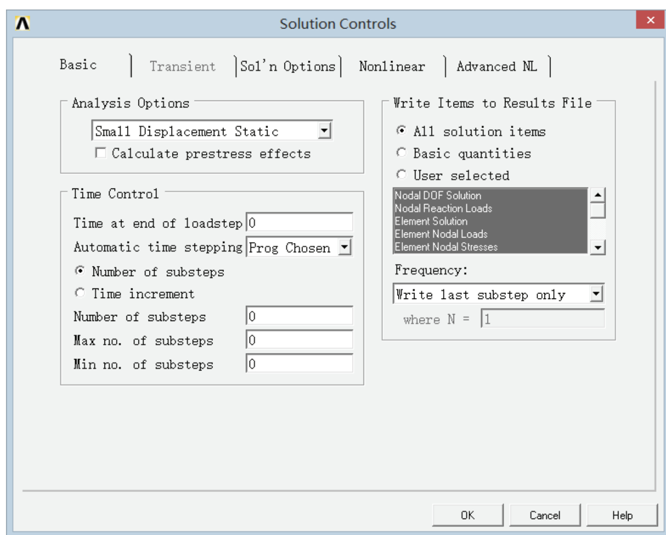


图 7-4　Solution Controls 对话框

表 7-2　Solution Controls 对话框中的各选项卡及其功能

选　项　卡	功　　能
Basic	基本选项卡，包括分析类型的设置、载荷步时间步控制、输出控制等常用设置
Transient	瞬态选项卡，只在选择了瞬态分析时此选项卡才可用
Sol'n Options	求解选项卡，主要用于选择求解方法
Nonlinear	非线性选项卡，在这里用户可以指定以何种方式估计求解过程中自由度约束情况
Advanced NL	其他高级非线性选项卡

1．基本选项

基本选项卡提供了基本控制里最重要的两方面内容，分别是时间控制及控制写入结果文件的频率，如图 7-5 所示。

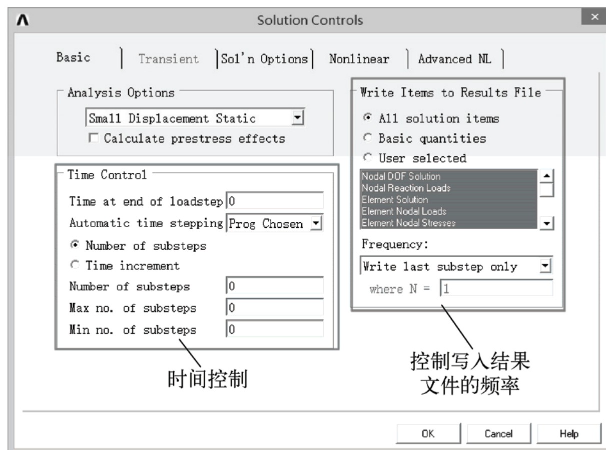


图 7-5　Basic 选项卡

（1）时间。确定载荷步结束的时间，在稳态分析中时间没有确切的意义，是一个用作跟踪载荷的参数。第一个载荷步的默认值为 1.0，相应后面每一步为前一个载荷步加 1.0。而对于瞬态分析则为实际时间。

（2）时间子步。一般非线性分析，每一个载荷步多需要很多载荷子步。程序默认为每一个载荷步一个载荷子步。

（3）写入结果控制。控制写入数据库和结果文件的内容和频率。

对于瞬态分析，在热梯度较大的区域（如淬火体的表面），热流方向的最大单元尺寸和能够得到好结果的最小时间步长有一个关系。在时间步保持不变的时候，更多的单元通常会得到更好的结果；但是，在网格尺寸不变的时候，子步越多，结果反而会变得更差。当采用自动时间步和代中间节点的二次单元时，ANSYS 建议使用者根据输入的荷载来控制最大的时间步长。

根据下面的关系来定义最小的时间步长：

$$ITS = \Delta^2 / 4\alpha$$

其中，Δ为在热梯度最大处沿热流方向的单元长度，α为扩散率，它等于导热系数除以密度与比热的乘积（$\alpha=k/pc$）。当采用有中间节点的单元时，如果违反上述关系式，ANSYS 的计算会出现不希望的振荡，计算出的温度会在物理上超出可能的范围。如果不采用带中间节点的单元，则一般不会计算出振荡的温度分布，那么上述建议的最小时间步长就有些保守。

2．瞬态选项卡

只有在进行瞬态分析时，才需要对该项进行控制。若在一个载荷步中有两个或两个以上载荷子步，就必须选择所施加载荷为阶跃载荷还是坡度载荷。

所谓阶跃载荷，就是指在第一个子步施加上去全部载荷，载荷在以后的每一个子步保持不变。

所谓坡度载荷，是指在每一个载荷步子步，载荷值都是递增的，直到最后一个载荷子步，全部的载荷才施加上去。

3．求解选项卡

Sol'n Options 选项卡用于选择合适的求解方法，如图 7-6 所示。

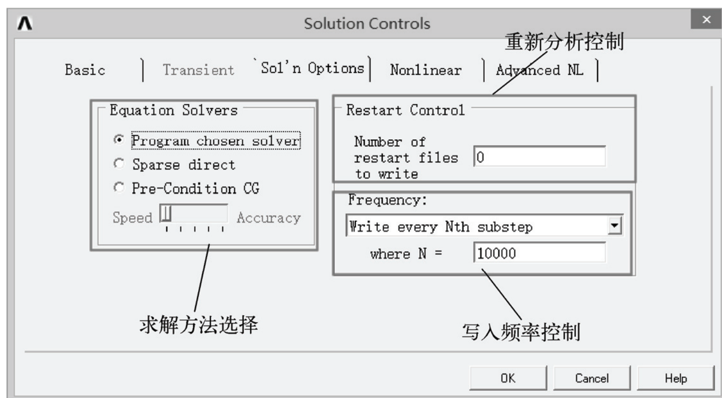


图 7-6　Sol'n Options 选项卡

4．非线性选项卡

如果分析为非线性分析，则需要确定非线性载荷选项，如图 7-7 所示。

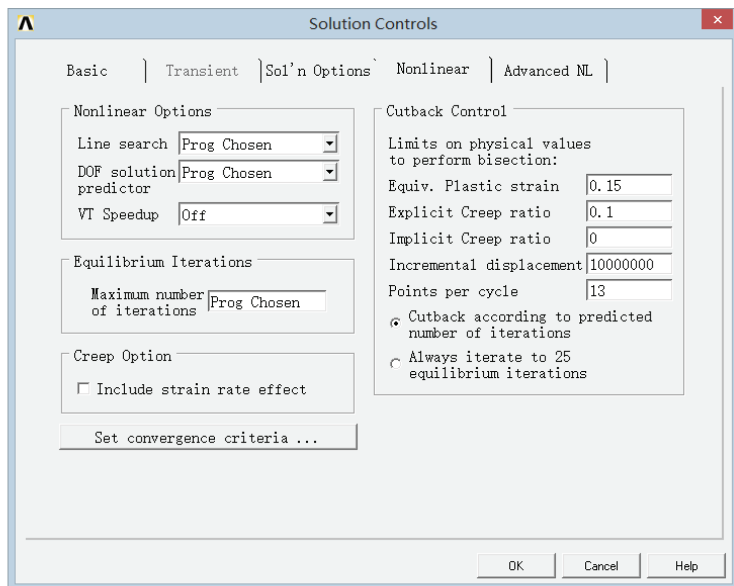


图 7-7　Nonlinear 选项卡

（1）平衡迭代数。用于确定每个载荷子步的最大平衡迭代数，程序默认值为 25 步，对于大多数非线性热分析是足够的。

（2）收敛公差。当预定的收敛准则达到之后，ANSYS 认为非线性分析收敛。收敛的判定可以基于温度、热流或者两者同时应用。

用户可以通过 CNVTOL 命令确定收敛变量以及收敛公差值。收敛公差确定之后，收敛准则也就好确定了。例如，计算的目标温度为 500℃，收敛公差为 0.001，那么温度的收敛准则为 0.5℃。

（3）对不收敛结果的处理。如果不能够在给定的载荷步内使计算结果收敛，ANSYS 会终止计算或进行下一个载荷步的计算，取决于用户的设置。

（4）线性搜索。使 ANSYS 通过牛顿—拉普森方法进行线性搜索。

7.1.3 输出设置

执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls 菜单命令，展开输出控制子菜单，如图 7-8 所示。

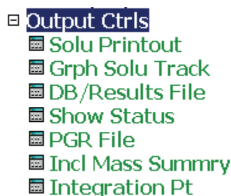


图 7-8　输出控制子菜单

（1）打印输出控制（Solu Printout）。控制在 Jobname.OUT 文件里的结果输出。

（2）数据库和结果输出控制（DB/Results File）。控制结果文件 Jobname.RTH 中的数据文件及结果输出。

7.2　求解过程处理

求解过程处理是 ANSYS 读取有限元模型及其上的载荷信息，建立联立方程并使用不同的求解器得出求解结果的过程。

7.2.1　求解概述

在完成模型建立及载荷加载等操作之后，就需要对该模型进行求解运算。执行 Main Menu→Solution→Solve 菜单命令，展开求解子菜单，如图 7-9 所示。



图 7-9　求解子菜单

各项菜单命令及其功能见表 7-3。

表 7-3　求解子菜单命令

菜　单　项	功　　能
Current LS	求解当前载荷步
From LS Files	求解特定载荷步
Adaptive Mesh	激活 ANSYS 宏，不断进行网格细化和求解

7.2.2　求解当前载荷步

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出本次求解的相关信息对话框。用户可以查看当前的状态，如分析类型、载荷步选项等是否正确，确认无误后单击图 7-10 所示的 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮。

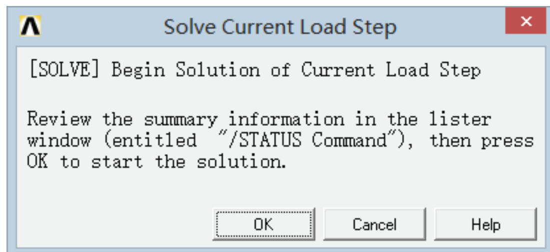


图 7-10　Solve Current Load Step 对话框

7.2.3 多载荷步求解

定义和求解多载荷步，主要有以下 3 种方法。

1．多重求解法

该方法最直接，它在每个载荷步定义好后执行 SOLVE 命令。它的主要缺点是，在交互式操作中，必须等到每一步求解结束后才能定义下一载荷步。

2．载荷文件法

该方法是比较方便的一种方法。它将每一载荷步写到载荷步文件中，通过一条命令就可以读入所有文件并获得求解结果。求解多载荷步，执行 Main Menu→Solution→Solve→From LS Files 菜单命令，弹出图 7-11 所示的 Solve Load Step Files 对话框。

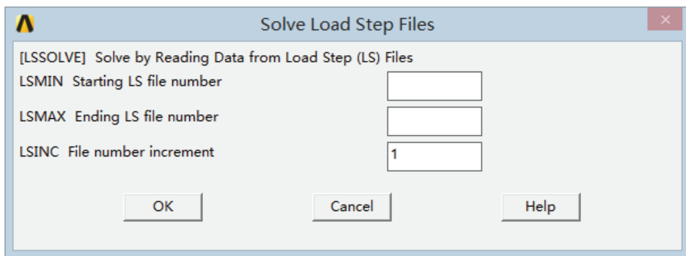


图 7-11 Solve Load Step Files 对话框

其中，LSMIN 项为起始载荷步文件编号；LSMAX 项为截止载荷步文件编号；LSINC 为载荷步文件增量。

3．矩阵参数法

主要用于瞬态或非线性静态分析，需要了解有关数组参数和 DO 循环的知识。数组参数包括用数组参数法建立载荷—时间关系表。

假定有一组随时间变化的载荷，见表 7-4，因为有 3 个载荷函数，所以需要定义 3 个数组参数，所有的 3 个数组必须是表格形式。力函数有 4 个点，所以需要定义一个 4×1 的数组；压力函数需要一个 3×1 数组，温度函数需要一个 2×1 的数组。

表 7-4 一组随时间变化的载荷

温 度		热 流 率		热 生 成 率	
时间	值	时间	值	时间	值
0	200	0	50	0	150
10	400	15	70	30	600
20	600	35	60		
30	800				

执行 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit 菜单命令，弹出 Array Parameters 对话框，单击 Add 按钮，弹出图 7-12 所示的添加数组对话框。

在 Par 文本框中输入参数名 TEMPERATURE，在 Type 选项组中选中 Table 单选按钮，



I、J、K 分别为数组的维数，分别输入 2，1，0。Var1、Var2、Var3 分别是行、列和面的变量，在默认情况下为 Column、Row 和 Plane，这里不用设置，单击 OK 按钮。

接着在 Array Parameters 对话框中选中 TEMPERATURE，单击 Edit 按钮，弹出图 7-13 所示的 Array Parameter TEMPERATURE 对话框。将温度的数据输入表格中，执行 File→Apply/Quit 菜单命令，退出对话框。这样温度数据表格就创建完成，可以采用同样的方法创建其他数组。

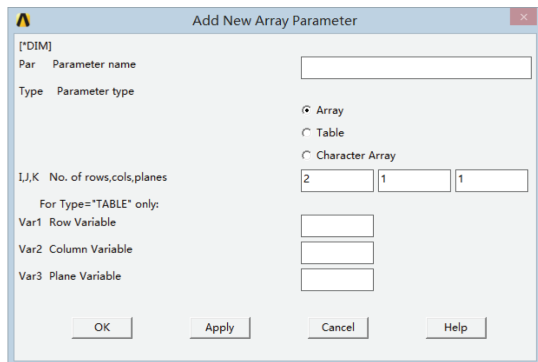


图 7-12 Add New Array Parameter 对话框

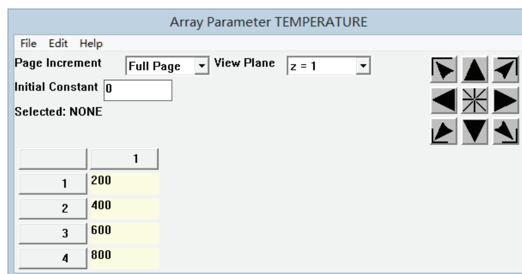


图 7-13 Array Parameter TEMPERATURE 对话框

7.3 本章小结

本章详细介绍了求解选项的设置，包括新分析类型的选择、求解控制和输出控制。本章分别对其设置方法进行了讲解，并分类介绍了简单求解过程和多载荷步求解过程，以及多载荷步求解的 3 种求解方法。

第8章 后 处 理



后处理用来检查、分析和输出计算结果，是对求解分析过程是否合理的反馈，主要包括通用后处理器 POST1 和时间–历程后处理器 POST26。本章主要针对后处理的基本概念、后处理可以处理的数据类型、图形显示和列表显示计算结果、时间–历程变量的定义和显示等方法进行介绍。

学习目标：

（1）掌握通用后处理器的适用情况，可以处理的数据类型和数据处理方式。

（2）掌握时间–历程后处理器的适用情况，可以处理的数据类型和数据处理方式。

8.1 后处理概述

ANSYS 后处理部分的功能就是将结果可视化，帮助用户快捷、有效地查看和分析计算结果，是整个分析过程的重要环节。ANSYS 后处理器是用于检查分析结果的工具，用来判断一个分析的结果是否正确，需要用户具备相关工程理论方面的基础知识。

在 ANSYS 中，检查分析结果可以使用通用处理器 POST1 和时间–历程后处理器 POST26。POST1 用于查看整个模型在某一个载荷步和子步的相应结果；POST26 用于查看指定节点的某一结果相对于时间、频率或其他结果项的变化情况。

后处理器可以处理基本数据和派生数据两种数据类型，后处理的所有操作和运算均是针对这两种数据进行的。

（1）基本数据是指每个节点求解所得的自由度解，如结构分析的节点位移、热分析求解的温度、磁场求解的磁势等，这些结果被称为 nodal solution 数据。

（2）派生数据是由基本数据导出的结果数据，如结构分析中的应力和应变、热分析求解的热梯度和热流量、磁场求解的磁通量等。通常是计算每个单元的所有节点、每个单元的所有积分或每个单元的质心上的派生数据，所以派生数据也称为 element solution 数据。

8.1.1 通用后处理器

POST1 的作用是可以查看整个模型在某一载荷和子步或针对某一特定时间点的结果，包括温度、温度梯度、热流率等，以及结果的动画显示和控制等。POST1 有许多功能，包括从简单的图像显示到针对更为复杂数据操作的列表等。

执行 Main Menu→General Postproc 菜单命令进入 POST1 通用后处理器，一旦完成操作，在 POST1 项中就会出现 Plot Results 菜单命令，通用后处理器菜单如图 8-1 所示。



8.1.2 时间-历程后处理器

POST26 的作用是检查模型的指定节点的某一结果相对于时间、频率或其他结果项的变化，具有图形显示、列表、微积分操作等分析能力。通常时间-历程后处理器包含定义变量、对变量进行计算和处理、通过多种方式查看结果等过程。

执行 Main Menu→TimeHist Postpro 菜单命令，进入时间-历程后处理器，如图 8-2 所示。

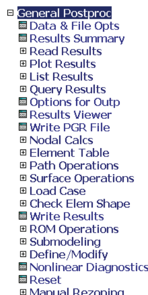


图 8-1 通用后处理器

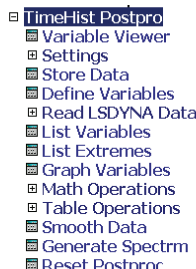


图 8-2 时间-历程后处理器

8.2 通用后处理器

使用 POST1 通用后处理器可观察整个模型或模型的一部分在某一时间点（或频率）上针对指定载荷组合时的结果。POST1 有许多功能，包括从简单的图像显示到针对更为复杂数据操作的列表，如载荷工况的组合。执行 Main Menu→General Postproc 命令可以进入通用后处理器。

8.2.1 结果文件读入通用后处理器

当数据库中有了模型数据，包括单元类型、节点、单元、单元实常数、材料特性和节点坐标系等数据之后，进入 POST1 后的第一步就是将结果数据从结果文件读入数据库。而要将结果数据读入数据库，需要指定包含结果数据的结果文件。

默认情况下，ANSYS 会在当前工作目录下寻找当前工作文件名命名的结果文件。若想从其他结果文件中读入结果数据，执行 Main Menu→General Postproc→Data&File Opt 菜单命令，弹出 Data and File Options 对话框，如图 8-3 所示。

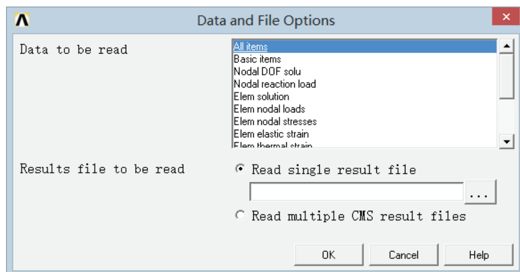


图 8-3 Data and File Options 对话框

在该对话框中可以选择从哪个结果文件中读取数据和读入哪些数据。其文件名为当前数据库名，扩展名以 R 开头，如结构分析的扩展名为 RST，热分析的扩展名为 RTH，流体动力学分析的扩展名为 RFL，电磁分析的扩展名为 RMG 等。

以上方法将结果文件读入通用后处理器外，对于计算过程中的具体时间步的结果数据，可以从主菜单中选择 Main Menu→General Postproc→Read Results 命令，以不同的方式选取某一子步结果数据并将其读入数据库中，同时覆盖之前在数据库中存在的数据，具体的命令及功能见表 8-1。

表 8-1 Read Results 子菜单命令

菜 单 命 令	功 能
First Set	读入第一子步的结果数据
Next Set	读入下一子步的结果数据
Previous Set	读入前一子步的结果数据
Last Set	读入最后一个子步的结果数据
By load Step	通过指定载荷步及其子步读入结果数据
By Time/Freq	通过指定时间或频率点读取结果数据。如果在指定时间点上没有结果数据，则 ANSYS 程序将通过线性插值计算出在指定的时间点上的结果值
By Set Number	直接读取指定步的结果数据

提示：在通常的单载荷步稳态分析中，求解完成后，结果数据已经存在于数据库中，如果继续进行后处理，则可以不必再进行读入结果数据的操作。

8.2.2 设置结果输出方式

在进行结果后处理时，用户可以设置结果输出方式对结果进行控制。在不同的控制条件下输出的结果信息存在很大的差异，因此，在后处理操作时必须注意与后处理结果输出控制相关的这些选项。

执行 Main Menu→General Postproc→Options for Output 菜单命令，打开图 8-4 所示的 Options for Output 对话框。对话框中各选项的功能见表 8-2。

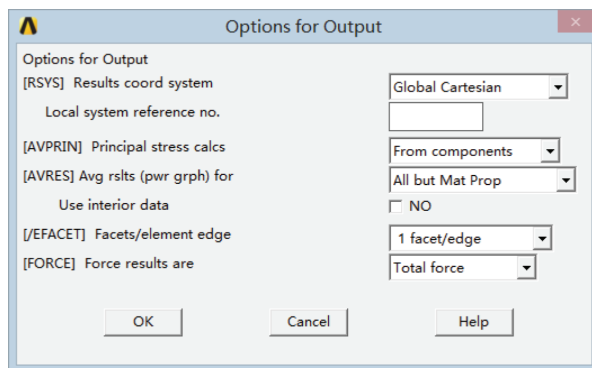


图 8-4 Options for Output 对话框

表 8-2　输出控制各项及功能

选　　项	功　　能
Results coord system	选择结果坐标系，即结果输出时的参照坐标系。许多结果选项如应力分量、应变分量等都是参照结果坐标系输出的
Principal stress calcs	当两个或更多单元共用一个节点时，选择利用结果分量计算该节点导出结果的方法
Avg rslts（pwr grph） for	当 Power Graphics 打开时，表示计算平均结果设置
Facets/element edge	选择结果数据平均处理的方法
Force results are	控制输出单元节点载荷选项，控制输出载荷方式

其中，选择结果坐标系选项在结果输出控制选项对话框中可能经常需要改变，可以从 Results coord system 下拉列表框中选择合适的坐标系。如果选择将结果坐标系旋转到局部坐标系，不仅要在结果坐标系的下拉列表框中选择 Local system，还需要在 Local system reference no 文本框中输入局部坐标系的参考号。

提示：对于一般用户的数据处理，程序默认设置已经足够，不需要专门进行设置。

8.2.3 图形显示计算结果

ANSYS 程序提供了查看和分析模型在载荷作用下的变形图、等值线图和矢量图等功能。

1．查看和分析等值线图

等值线图（云图）的绘制，将具有相同数值的区域用相同的颜色表示，通过颜色的变化来体现结果的变化。等值线显示表现了结果项（如温度）在模型上的变化，因此，通过等值线可以直观地观察模型某结果项的分布情况。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot 菜单命令，打开等值线绘制子菜单项，其中包括 Nodal Solu（节点结果）、Element Solu（单元结果）、Elem Table（单元表）、Line Elem Res（线单元结果）4 个命令。

（1）Nodal Solu：生成连续的过整个模型的等值线，可用于原始解或派生解。派生解在单元之间通常是不连续的，因此需要在节点处进行平均，以便 ANSYS 程序能显示连续的等值线。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，打开图 8-5 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

在该对话框中，需要在 Item to be contoured 选项组中指定生成等值线图的结果数据类型，根据分析类型的不同，可用于生成等值线的结果数据也各不相同。还可以在 Undisplaced shape key 下拉列表框中选择在生成的等值线图中是否显示未变形的模型，以及在 Scale Factor 下拉列表框中选择模型变形显示的比例，在涉及应力分析的模型中可以选中以查看模型的变形状况。

（2）Element Solu：生成在单元边界上不连续（即颜色过渡不平滑）的等值线图。主要用于派生解的结果显示，其操作方式与 Nodal Solu 相同。

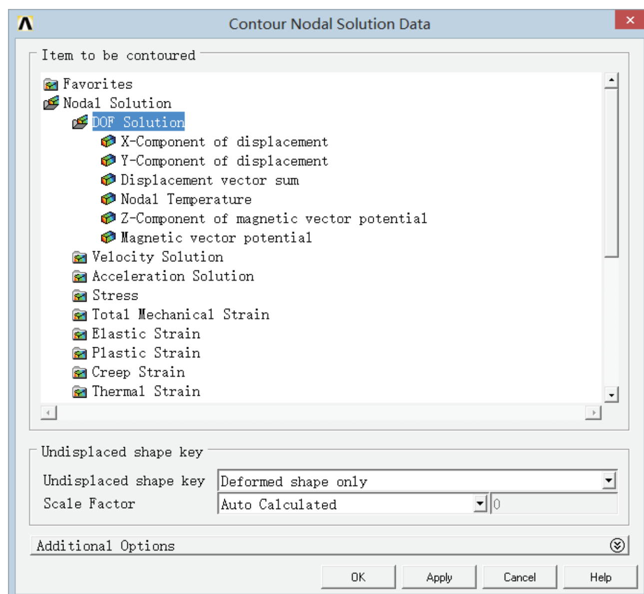


图 8-5　Contour Nodal Solution Data 对话框

（3）Elem Table：生成单元表中数据的等值线图。执行该命令，弹出图 8-6 所示的 Contour Plot of Element Table Data 对话框。

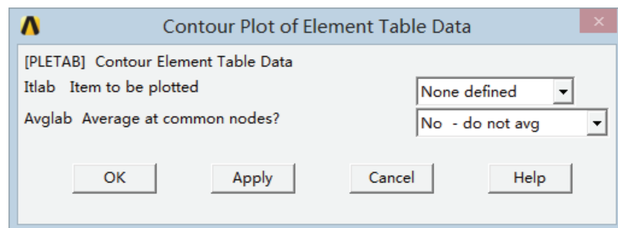


图 8-6　Contour Plot of Element Table Data 对话框

在该对话框中，通过 Avglab Average at common nodes 下拉列表框可以控制是否在单元之间的公共节点处将结果数据进行平均，默认状态是不平均，即生成不连续的等值线。

（4）Line Elem Res：生成一维单元的等值线图。要求数据存储在单元表中，常用在梁分析中对剪力和力矩图进行显示。

2．查看和分析矢量图

矢量就是带方向的物理量，在用矢量方式显示计算结果的时候，ANSYS 用一个带箭头的线段表示矢量，其中箭头的长度表示计算结果的大小，而箭头的方向表示结果的方向。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Vector Plot 菜单命令，展开矢量方式显示计算结果子菜单，其中有 Predefined（预定义）和 User-defined（自定义）两个命令。

（1）Predefined（预定义）。

对于热分析，用矢量方式显示温度梯度、位移、应力、电流密度等矢量结果项，可以满足大多数要求的矢量显示计算结果。

执行该命令后，弹出图 8-7 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。在该对话框中，Item Vector item to be plotted 为要生成矢量图的结果数据类型，包括位移、应力、电流密度、热流率/梯度等。

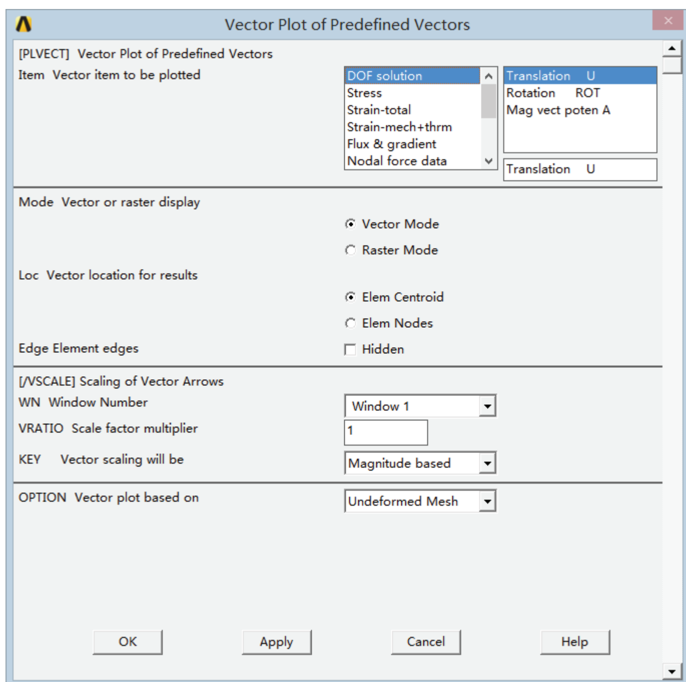


图 8-7 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

在 Mode Vector or raster display 选项组中选择矢量显示方式是矢量方式（Vector Mode）还是光栅方式（Raster Mode）。Loc Vector location for results 选项组中选择结果显示位置是单元形心位置（Elem Centroid）还是单元节点位置（Elem Nodes）。

（2）User-Defined（自定义）。

矢量方式显示用户自定义的结果项，需要指定矢量代表的 3 个分量 I/J/K-component of vector，同时也要控制矢量显示方式和显示位置。

提示：对于特定单元，可以显示的结果类型不同。用户可以在 ANSYS HELP 文件的 Element Reference 中对应单元的 Output Data 项中查看该单元支持的结果类型。

8.2.4 列表显示计算结果

除了用图形方式直观显示结果外，有时需要用列表的方式详细介绍每个节点、单元或其他位置的某项结果的具体方向与大小等信息，并允许存储到指定的文件夹中，以更方便、精确地得到某个局部解的数值。

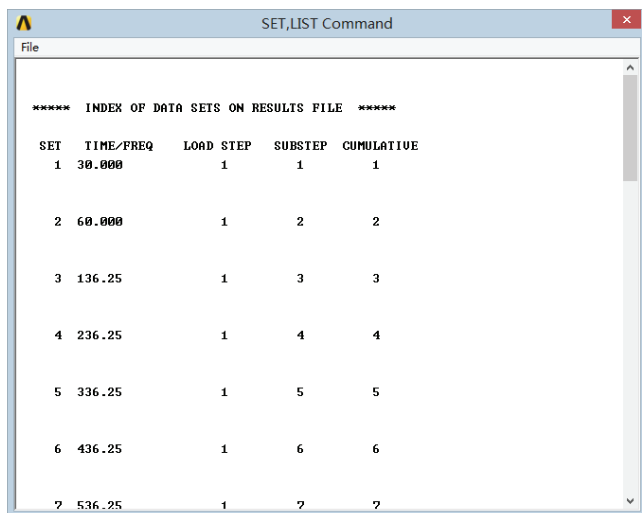
执行 Main Menu→General Postproc→List Results 菜单命令，展开列表显示计算结果子菜单，如图 8-8 所示。

1．Detailed Summary（结果数据集汇总列表）

执行该命令将显示 Detailed Summary（结果数据集汇总列表）信息（见图 8-9），显示结果文件包含的结果序列信息。



图 8-8 列表显示计算结果子菜单


SET,LIST Command

File

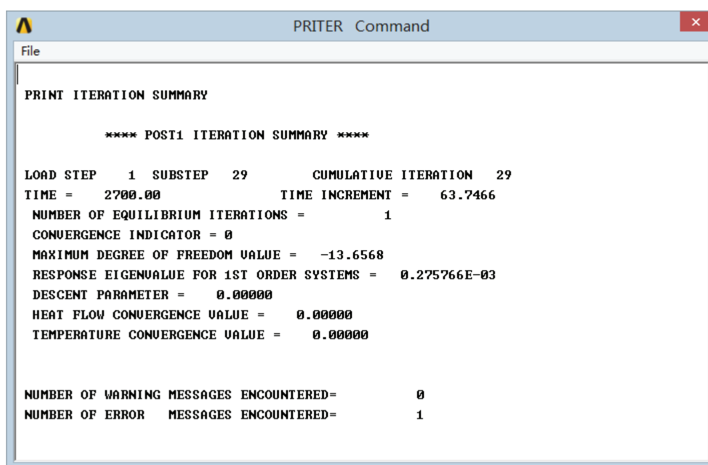
***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	30.000	1	1	1
2	60.000	1	2	2
3	136.25	1	3	3
4	236.25	1	4	4
5	336.25	1	5	5
6	436.25	1	6	6
7	536.25	1	7	7

图 8-9 SET,LIST Command 列表窗口

2．Iteration Summary（迭代汇总列表）

执行该命令将显示在本分析的求解过程中的迭代次数及相关信息。显示求解过程中的迭代情况，如迭代次数（Number of Equilibrium Iterations）、收敛精度（Convergence Indicator）、最大自由度值（Maximum Degree of Freedom Value）及一些收敛值（Convergence Values）等。图 8-10 所示为某程序分析的 PRITER Command 信息窗口。


PRITER Command

File

```
PRINT ITERATION SUMMARY

          **** POST1 ITERATION SUMMARY ****

LOAD STEP     1  SUBSTEP    29        CUMULATIVE ITERATION    29
TIME =     2700.00                TIME INCREMENT =     63.7466
 NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS =          1
 CONVERGENCE INDICATOR = 0
 MAXIMUM DEGREE OF FREEDOM VALUE =    -13.6568
 RESPONSE EIGENVALUE FOR 1ST ORDER SYSTEMS =    0.275766E-03
 DESCENT PARAMETER =     0.00000
 HEAT FLOW CONVERGENCE VALUE =     0.00000
 TEMPERATURE CONVERGENCE VALUE =     0.00000


NUMBER OF WARNING MESSAGES ENCOUNTERED=          0
NUMBER OF ERROR   MESSAGES ENCOUNTERED=          1
```

图 8-10 PRITER Command 信息窗口

3．Sorted Listing（排序列表）

Sorted Listing 命令用于指定列表显示时的显示顺序方式。在该菜单中定义之后，在以后

的列表操作中均有效。该子菜单中各命令的功能如下。

（1）Sort Nodes：节点顺序排列，按照节点的某项结果进行升序或降序排列。执行该命令，弹出图 8-11 所示的 Sort Nodes 对话框。

在该对话框中，ORDER 项指定结果项列表显示顺序（升序或降序），KABS 项控制排序之前是否对结果数据进行绝对值处理，SELECT 项控制是否选择排序的节点，Item、Comp 项确定排序的结果项。

（2）Unsort Nodes：取消节点排序。

（3）Sort Elem：按照单元的某结果项进行升序或降序排列。其基本方法与节点排序一致，但是只能按照预定义的单元表结果进行排序，所以必须利用 Element table 功能先定义结果项单元表。

（4）Unsort Eelms：取消单元排序。

4．Nodal Solution（节点结果）和 Element Solution（单元结果）

Nodal Solution 用于显示选定节点的结果。选中要列表显示的节点，执行 Nodal Solution 命令，打开图 8-12 所示的对话框，选中要显示的结果项，单击 OK 按钮，列表显示结果值。

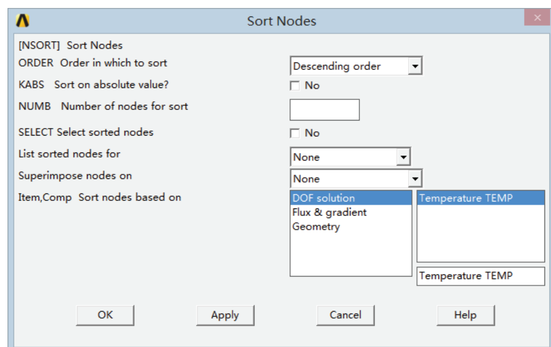


图 8-11 Sort Nodes 对话框

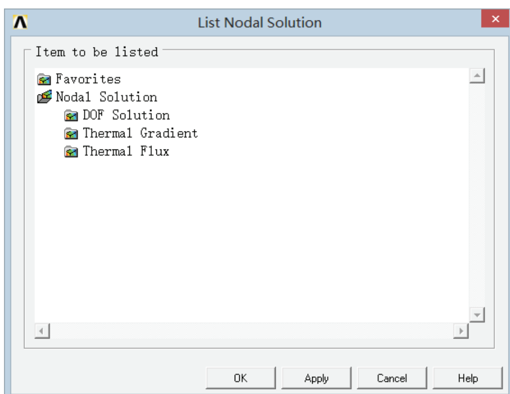


图 8-12 List Nodal Solution 对话框

Element Solution 命令与 Nodal Solution 命令类似，列表显示结果项，只是 Nodal Solution 为原始解，而 Element Solution 项为派生解。

8.2.5 结果查看器

ANSYS 提供了一个集成化的环境来查看计算结果及绘制图形等，这个环境就是结果查看器。执行 Main Menu→General Postproc→Results Viewer 菜单命令，弹出图 8-13 所示的结果查看器。

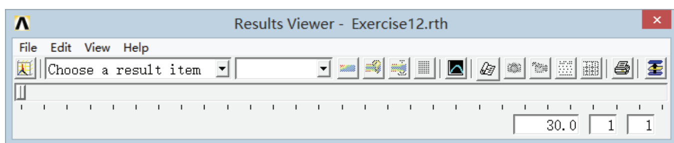


图 8-13 结果查看器

激活结果查看器之后，ANSYS 通用界面通常会发生变化，许多图形用户界面（GUI）菜单失效，但通用后处理器中的大部分功能都被保留下来并可以使用。结果查看器工具栏集成了许多功能，具体如下。

（1）选择结果数据和可选绘制图形式：通过在结果数据项的下拉列表中选择要查看的结果数据项，然后在可选绘图形式的下拉列表中选择相应的绘图形式选项。

（2）查看结果快捷方式：可以通过查看结果快捷方式来选择如何查看结果，快捷方式的图表及含义如下。

1）（Plot Results）：绘制图形。

2）（Query Results）：查询计算结果。

3）（Animate Results）：通过动画显示结果。

4）（List Results）：列表显示计算结果。

5）（Time-History Variable Viewer）：查看与时间相关的变量。

（3）报告生成器：将显示的图形、动画、结果列表等存储在一个报告文件中，便于方便组织结果数据。

（4）结果序列访问控制：在结果查看器工具栏右下方的结果序列访问控制中包括 3 个文本框，从左到右依次为时间、载荷步和子载荷步。用户只要在其中输入时间或者载荷步或子步的编号，就可以将结果序列指定为用户输入的内容。

8.2.6 基于单元表的结果处理

单元值表可以被认为是工作表，其行代表所有被选择的单元，其列代表单元值。每一列数据有一个用户定义的名称，用于列表和显示。定义单元值表以便后续处理。执行 Main Menu →General Postproc→Element Table 菜单命令，打开单元表操作子菜单，如图 8-14 所示。

1．定义单元表

执行 Define Table 命令，弹出 Element Table Data 对话框，单击 Add 按钮，弹出图 8-15 所示的 Define Additional Element Table Items 对话框。

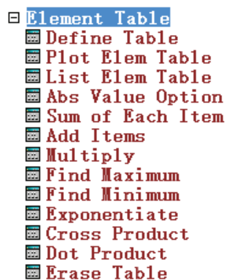


图 8-14 单元表操作子菜单

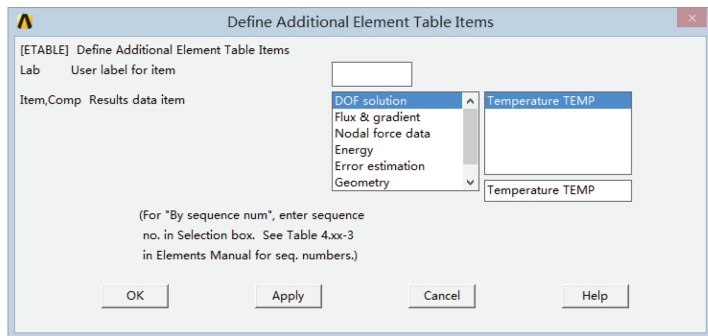


图 8-15 Define Additional Element Table Items 对话框

Lab 项用于定义单元表名，用于后续命令或输出的标题，最多可使用 8 个字母，不可与预定义的表名称重复。本次结果将被包含在同一表中，最多可定义 200 个不同的表名。

以下表名是 ANSYS 预定义的，不可用作用户自定义表名：REFL、STAT、ERAS。Lab

= REFL 以 ETABLE 的最新选项重写所有 ETABLE 命令预定义的表，但保留字段将被忽略，这个命令在载荷步改变后重写表时很方便；Lab = STAT 将显示存储的表的值；Lab = ERAS 将删除整个表。

Item,Comp 项用于选定要建立的单元表中的单元值项，即确定单元表中存储的结果项。

2．显示和列表单元表

单元表定义完成后，可以对单元表进行显示和列表。执行 Plot Elem Table 命令，弹出图 8-16 所示的 Contour Plot of Element Table Data 对话框，Itlab 为要显示的单元表名，Avglab 项控制在单元公共节点处结果是否取平均值。单击 OK 按钮，将显示选定单元表所代表的单元的结果值。

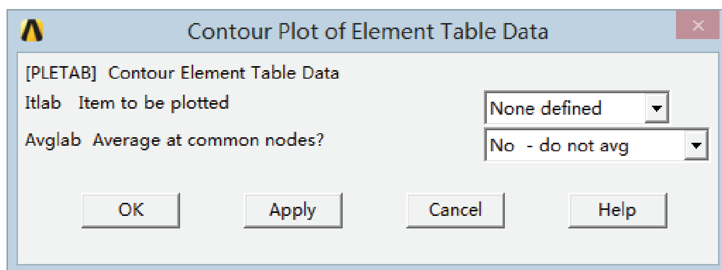


图 8-16 Contour Plot of Element Table Data 对话框

选中 List Elem Table，选择要列表显示的单元表，显示结果项。

3．单元表的操作

单元表定义完成后，除了显示数据外，还可以对数据进行许多操作，菜单命令及其功能见表 8-3。

表 8-3 单元表操作功能

菜单命令	命令	功能
Abs Value Option	SABS	对单元表中数据取绝对值
Sum of Each Item	SSUM	计算单元表中数据总和并输出
Add Items	SADD	计算两单元表之和，结果为单元表
Multiply	SMULT	计算两单元表之积，结果为单元表
Find Maximum	SMAX	对两单元表比较，取较大值，结果为单元表
Fine Minimum	SMIN	对两单元表比较，取较小值，结果为单元表
Exponentiate	SEXP	对两单元分别取幂并相乘，结果为单元表
Cross Product	VCROSS	对两单元表叉乘，结果为单元表
Dot Product	VDOT	对两单元表点乘，结果为单元表

4．清除单元表

在 Define Table 中弹出 Element Table Data 对话框，选中要删除的单元表，单击 DELETE 按钮删除单元表。如果要清除所有的单元表，执行 Main Menu→General Postproc→Element Table→Erase Table 菜单命令，即可删除所有的单元表。

8.2.7 基于路径的结果处理

路径是模型上由一系列节点或位置定义的轨迹。路径操作就是将某结果项映射到模型中指定的路径上。对路径可以执行各种数学运算和微积分运算，可以观察路径上某结果项的分布状态，并利用曲线、图形、列表方式显示。用户只能在实体单元和壳单元模型上定义路径，一维单元不能定义路径。

执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations 菜单命令，展开路径操作子菜单，如图 8-17 所示。

1. 定义路径

若要定义路径，首先确定路径环境和构成路径的点，然后决定建立路径的方式。展开 Define Path 子菜单，定义路径，包括 By Nodes（通过节点）、On Working Plane（拾取坐标面位置）和 By Location（通过坐标值）。



图 8-17 路径操作子菜单

在路径的定义中，需要确定以下几个概念。

（1）路径名。

（2）组成路径的点数，仅用于批处理方式或 By Location 方式定义路径。对于以其他方式定义的路径，该数等于拾取的节 点数。

（3）映射到该路径上显示结果的点数。至少 4 个点，默认为 30 个点，没有最大值限制。

（4）若使用 By Location 建立路径，需要指定活动的坐标系。

路径定义完成后，可以查看路径（Path Status）、修改路径（Modify Path）、删除路径（Delete Path）、显示路径（Plot Path）等，限于篇幅，不再详细叙述。

2. 映射结果到路径

执行 Map onto Path 命令，打开图 8-18 所示的 Map Result Items onto Path 对话框。

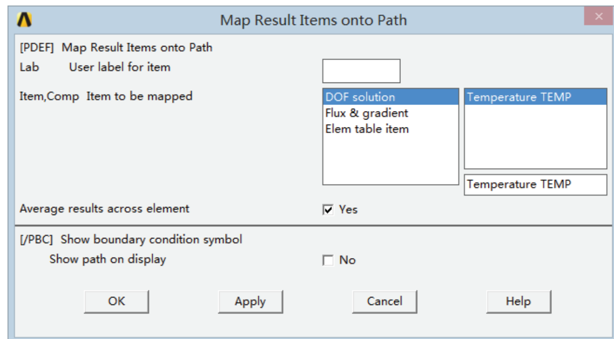


图 8-18 Map Result Items onto Path 对话框

Lab 项为在路径上映射的结果的有效名称，可以在其他路径操作中使用。Item,Comp 项为要映射的结果。单击 OK 按钮完成结果向路径的映射。

3. 绘制路径上结果

执行 Plot Path Item 命令，展开绘制路径上结果子菜单，其各命令及其功能见表 8-4。

表 8-4 Plot Path Item 子菜单命令及其功能

菜单命令	命令	功能
On Graph	PLPATH	绘制结果分布曲线
On Geometry	PLPAGM	绘制结果分布云图
List Path Items	PRPATH	列表显示结果

选中要进行的操作，选择路径上的结果项，即可完成对路径上结果的绘制操作。

4．对路径项目的操作

通过对已存在的路径上的结果项进行操作，如加、乘等，从而生成一个新的路径项目。ANSYS 提供的对路径项目的操作见表 8-5。

表 8-5 路径项目的操作

菜单命令	功能
Add	将已存在的两路径项目相加
Multiply	将已存在的路径项目相乘
Divide	将已存在的路径项目相除
Exponentiate	将已存在的路径项目求幂并相加
Differentiate	对已存在的路径项目求微分
Integrate	对已存在的路径项目求积分
Cosine	对已存在的路径项目求余弦
Sine	对已存在的路径项目求正弦
ArcCosine	对已存在的路径项目求反余弦
ArcSine	对已存在的路径项目求反正弦
Natural Log	对已存在的路径项目求自然对数
Cross Product	对已存在的两路径项目求叉乘
Dot Product	对已存在的两路径项目求点乘
Unit Vector	将一系列路径项目整合到一条路径上
Clear Path Items	清空路径项目

8.3 时间–历程后处理器

时间–历程后处理器 POST26 可用于检查模型中指定点的分析结果与时间、频率等的函数关系。它有许多分析能力：从简单的图形显示和列表到诸如微分和响应频谱生成的复杂操作。POST26 的一个典型用途是在瞬态分析中以图形表示产生结果项与时间的关系或在非线性分析中以图形表示作用力与变形的关系。可通过执行 Main Menu→TimeHist Postpro 命令进入时间–历程后处理器。

8.3.1 时间–历程后处理器概述

时间–历程后处理器主要用于观察模型中某点结果与时间的函数关系，这些结果可以通

过绘制曲线或列表查看。另外，还可以对结果数据进行代数运算产生新的曲线，也可以取绝对值、平方根、对数、指数以及求最大值和最小值等，并且也可以进行曲线的微积分运算。

时间-历程后处理器用于检查模型中指定点的分析结果与时间等的函数关系，其分析基础是变量，任何分析都是针对变量的。使用时间-历程后处理器，首先要定义所需的变量，并且对变量进行存储。

每个变量都被赋予一个参考号，用户对每个 POST26 变量任意指定大于或等于 2 的参考号，参考号 1 用于时间变量的显示、列表等操作都是通过变量参考号进行的。使用时间-历程后处理器的基本步骤。

（1）启动时间-历程后处理器。

（2）定义时间-历程变量，记得进行变量的存储。

（3）变量处理：数据计算、数据提取或产生相关的数据集。

（4）数据输出：以图形、列表及文件形式进行数据输出。

8.3.2 进入时间-历程后处理

在分析结束后，ANSYS 利用结果数据来生成一个结果文件。当启动处理器时，当前激活的结果文件会自动载入（*.RST，*.RFL，*.RTH，*.RMG 等）。若在当前的分析中没有任何结果文件，可以利用 Select Result File 命令来装载任何一个结果文件进入处理器。

执行 Main Menu→TimeHistPostpro 菜单命令，进入时间-历程后处理器，装载一个结果文件后，进行变量定义、变量处理和数据输出等过程。

8.3.3 定义时间—历程变量

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Define Variable 菜单命令，打开 Defined Time-History Variables 对话框，如图 8-19 所示。

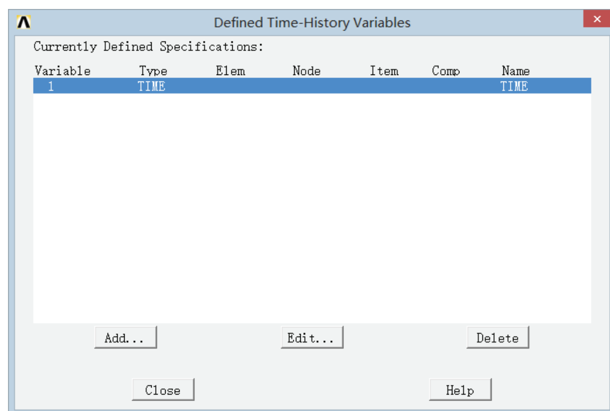


图 8-19 Defined Time-History Variables 对话框

在时间-历程后处理器中已存在参考号为 1 的时间变量。单击 Add 按钮，弹出图 8-20 所示的 Add Time-History Variable 对话框，选择结果类型，单击 OK 按钮，弹出节点拾取对话框，拾取要建立变量的节点，弹出图 8-21 所示的 Define Nodal Data 对话框。



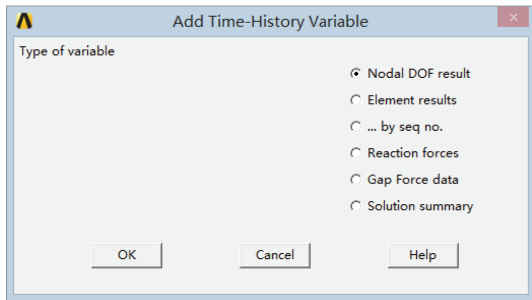


图 8-20　Add Time-History Variable 对话框

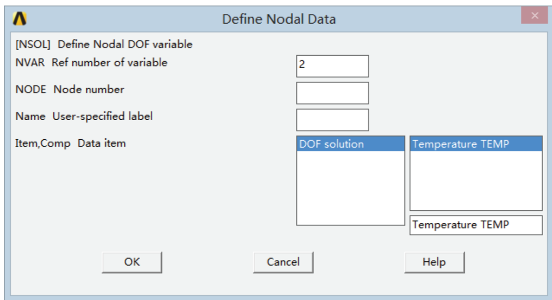


图 8-21　Define Nodal Data 对话框

NVAR 项设为时间-历程变量参考号，NODE 项设为节点编号，Name 项设为变量名称，Item，Comp 项选择变量的结果类型。单击 OK 按钮，完成时间-历程变量的定义。

在完成时间-历程变量的定义之后，若要定义更多的时间-历程属性，在图 8-19 所示的 Defined Time-History Variables 对话框中单击 Edit 按钮，进行变量属性的添加和修改。

8.3.4 时间-历程变量的处理

通常，对结果文件得到的指定分析数据进行处理时，可产生更有价值的附加变量集，这样在以后的分析中可结合其他数据量使用该变量。

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Math Operation 菜单命令，打开时间-历程变量数学处理子菜单，如图 8-22 所示，各项菜单命令及其功能见表 8-6。

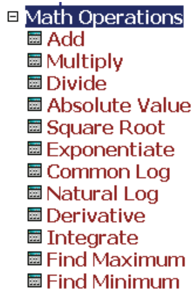


图 8-22　时间-历程变量数学处理子菜单

表 8-6　时间—历程变量数学处理子菜单命令及其功能

菜 单 命 令	功　　能
Add	将 3 个以内的时间-历程变量相加
Multiply	将 3 个以内的时间-历程变量相乘
Divide	将两个时间-历程变量相除
Absolute Value	对时间-历程变量求绝对值
Square Root	对时间-历程变量求平方根
Exponentiate	对时间-历程变量进行指数运算
Common Log	对时间-历程变量进行对数运算
Natural Log	对时间-历程变量进行自然对数运算
Derivative	对时间-历程变量进行微分运算
Integrate	对时间-历程变量进行积分运算
Find Maximum	对 3 个以内的时间-历程变量求最大值
Find Minimum	对 3 个以内的时间-历程变量求最小值

8.3.5 显示和列表时间–历程变量曲线

在完成时间–历程变量的直接定义或通过数学处理生成新的时间–历程变量后，就可以对时间–历程变量显示和列表。

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Graph Variable 菜单命令，弹出图 8–23 所示的 Graph Time-History Variables 对话框，可在一个图框中显示多达 9 个变量的图形。默认横坐标（X 轴）为变量 1，静态或瞬态分析表示时间。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Settings→Graph 菜单命令，可指定不同的变量号作为横坐标。

在相应的文本框中输入所定义变量的编号，单击 OK 按钮，图形窗口中将出现时间–历程变量的曲线图。

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→List Variables 菜单命令，弹出图 8–24 所示的 List Time-History Variables 对话框。输入要列表的变量的编号，单击 OK 按钮，就可以得到时间–历程变量的列表。

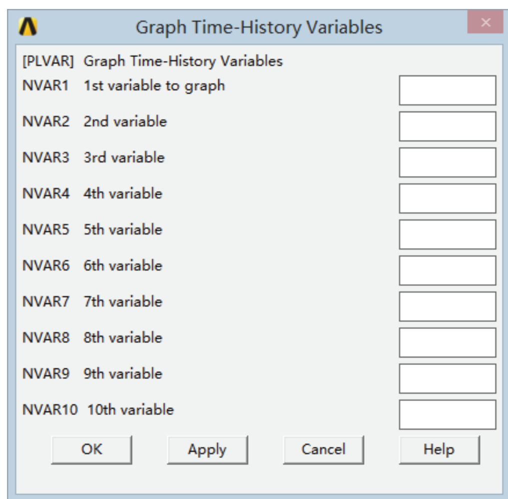


图 8–23 Graph Time-History Variables 对话框

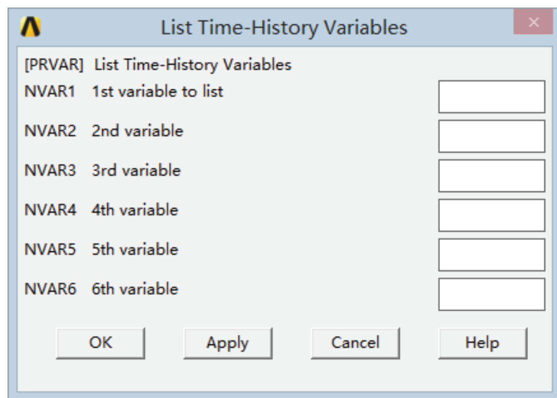


图 8–24 List Time-History Variables 对话框

8.3.6 时间–历程变量观察器

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Variable Viewer 菜单命令，打开 Time History Variables-Exercisel.rth 对话框。变量查看器集成了 Post26 的大部分功能，其界面如图 8–25 所示。

1．工具条

利用工具栏可控制大多数时间–历程处理操作，其中各按钮的功能按从左到右的顺序介绍如下。

（1）Add Data：打开 Add Time-History Variable 对话框。

（2）Delete Data：从变量列表中删除选定的变量。

（3）Graph Data：由预先定义的属性，绘制时间-变量曲线。

（4）List Data：生成数据列表。

（5）Properties：增加或修改属性信息。

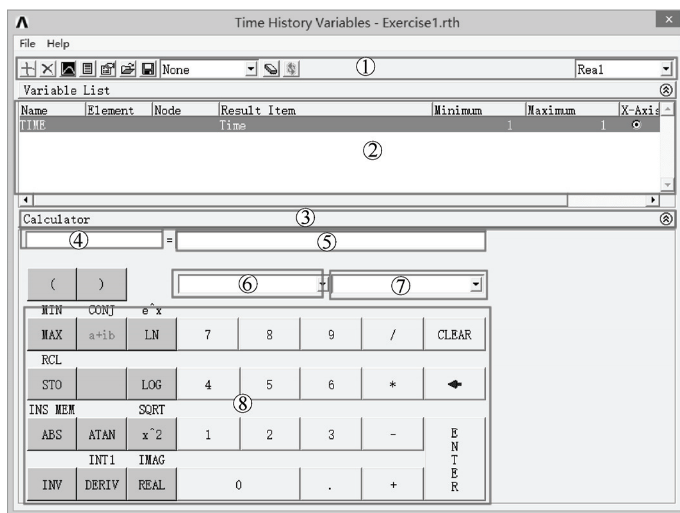


图 8-25　Time History Variables-Exercise1.rth 对话框

（6）Import Data：将信息输入变量空间。

（7）Export Data：将数据输出到文件和 APDL 数据数组。

（8）None Overlay Data：在下拉列表中选择用于图形覆盖的数据。

（9）Clear Time-History Data：清空列表中的数据。

（10）Refresh Time-History Data：刷新列表中的数据。

（11）Real Results to View：在下拉列表中选择复杂数据的输出格式。

2．变量列表（Variable List）

该区域显示已定义的时间-历程变量，可以从该列表中选择数据来进行处理。单击 Variable List 工具条，可以实现将变量列表显示或隐藏，以便在必要时节省屏幕空间。

3．显示或隐藏计算器（Calculator）

单击 Calculator 工具条，可以实现将计算器显示或隐藏，可暂时缩小观察器的尺寸大小。

4．变量名输入框

输入标识符以标识将要创建的变量，标识符最多为 32 个字符。当标识符不唯一时，将询问是否覆盖。

5．表达式输入框

输入变量所对应的表达式，其表达式可以由结果项组成。

6．APDL 变量下拉列表框

此下拉列表中列出了当前定义的 APDL 变量，在输入表达式时，可从中选择需要的变量加入表达式的输入项中。

7．时间-历程变量下拉列表框

在输入表达式时选择已存储的变量。

8．计算区域

使用计算器，只需单击相应按钮就可将标准的数学操作符和函数加入到表达式中。单击

INV 按钮，可轮流改变有些按钮的函数表示。

8.4 本章小结



本章详细介绍了通用后处理器 POST1 和时间-历程后处理器 POST26 的使用情况，可以处理的数据类型和数据处理方式。

POST1 的作用是查看整个模型在某一特定时间点的结果以及结果的动画显示和控制等。本章对 POST1 菜单各个子菜单的功能和操作方式进行了详细介绍，主要包括读取结果文件、设置结果输出方式、图形显示和列表显示计算结果、结果查看器、路径的结果显示以及基于单元表的结果处理等。

POST26 主要用于观察模型中某节点结果与时间的函数关系，本章详细介绍了 POST26 中的菜单方式和时间-历程观察器方式对变量的定义、处理和显示方法以及操作过程。

应 用 篇

第 9 章 稳态热分析

稳态热分析是 ANSYS 热分析中最基础的一部分。本章主要介绍了稳态热分析的基本理论，以及使用 ANSYS 进行稳态热分析的基本思路和操作步骤，以典型工程应用为示例，讲述了稳态热分析的基本思路及前后处理的应用技巧。

学习目标：

（1）理解稳态热分析基本理论；

（2）掌握 ANSYS 问题热分析的基本步骤；

（3）掌握应用 ANSYS 进行稳态热分析的基本方法及基本操作步骤、命令。

9.1 稳态热分析概述

如果热能流动不随时间变化的话，热传递就称为是稳态的。由于热能流动不随时间变化，系统的温度分布情况也不随时间变化。稳态热平衡满足热力学第一定律。

稳态传热用于分析稳定的热载荷对系统或部件的影响。通常在进行瞬态热分析以前进行稳态热分析以确定初始温度分布。

稳态热分析可以通过有限元计算确定由于稳定的热载荷引起的温度、热梯度、热流率、热流密度等参数。对于稳态热分析，表示热平衡的微分方程：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q=0 \quad (9\text{-}1)$$

相应的有限元平衡方程：

$$(K)\{T\}=\{Q\} \quad (9\text{-}2)$$

9.2 稳态热分析基本步骤

ANSYS 稳态热分析可分为以下 3 个步骤。

（1）前处理：建模。

（2）求解：施加载荷计算。

（3）后处理：查看结果。

1．建模

（1）确定 jobname、title、unit。

（2）进入 PREP7 前处理，定义单元类型，设定单元选项。

（3）定义单元实常数。

（4）定义材料热性能参数，对于稳态热分析，一般只需定义导热系数，它可以是恒定的，也可以是随温度变化的。

（5）创建几何模型并划分网格。

2．施加载荷计算

（1）定义分析类型。

1）如果进行新的热分析，执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，选中 Steady-State。

2）如果增加边界条件后继续上一次分析，则执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Restart 菜单命令。

（2）施加载荷。可以直接在实体模型或有限元模型上施加温度、热流率、对流、热流密度和热生产率 5 种载荷。

（3）确定载荷步选项。

（4）确定分析选项。

（5）求解。

3．查看结果

（1）进入通用后处理器或时间-历程后处理器。

（2）使用绘图或列表查看结果。

（3）查看误差估计。

（4）验证求解。

9.3 实例——铀燃料管冷却计算

9.3.1 问题描述

铀燃料填充于由锆锡合金制成的圆管中，管子内、外半径分别为 r1=4.125 mm，r2=4.635 mm，如图 9-1 所示。铀棒热产生功率为 $Q=8.73\times10^{8}$ W/m^3，管外有温度 t=127℃的冷却水流过，冷却水与管子外表面的表面传热系数为 10000 W/(m^2• ℃)。试确定稳态过程中铀棒的最高温度和保温材料外壁面的温度值。锆锡合金与铀燃料的导热系数分别为 17.2 W/(m^2• ℃)和 2.6 W/(m^2• ℃)。

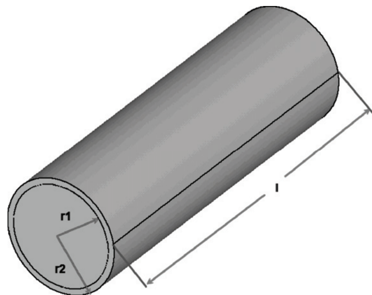


图 9-1 单根铀棒几何模型

9.3.2 问题分析

截取一轴向截面来实现仿真分析，截面角度为 90，如图 9-2 所示。分别选用 PLANE55 单元和 SOLID70 单元进行二维和三维的有限元分析。

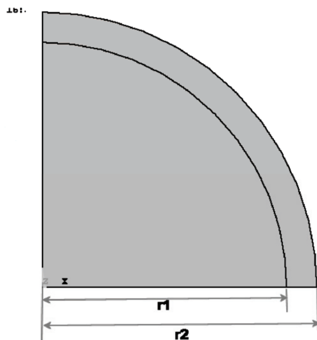


图 9-2 截面示意图

9.3.3 GUI 操作步骤

1. 平面对称截面的分析

（1）定义分析文件名。执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise9-1”，如图 9-3 所示，单击 OK 按钮。

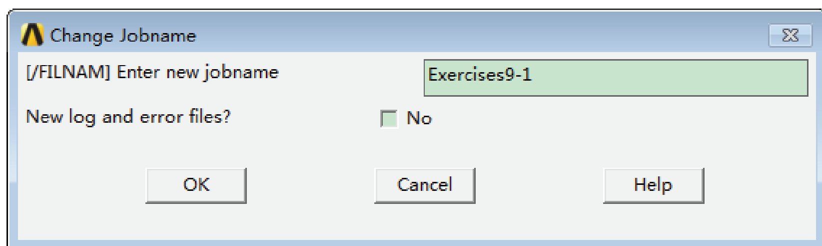


图 9-3 Change Jobname 对话框

（2）定义单元类型。执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，弹出 Element Types 对话框，如图 9-4 所示，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Solid 和 Quad 4node 55 选项，4 节点二维平面单元，如图 9-5 所示，单击 OK 按钮。

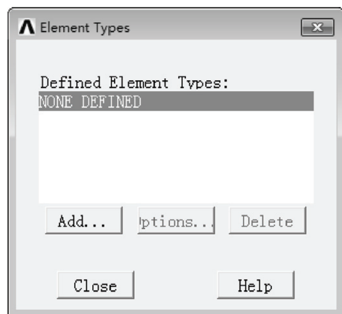


图 9-4 Element Types 对话框

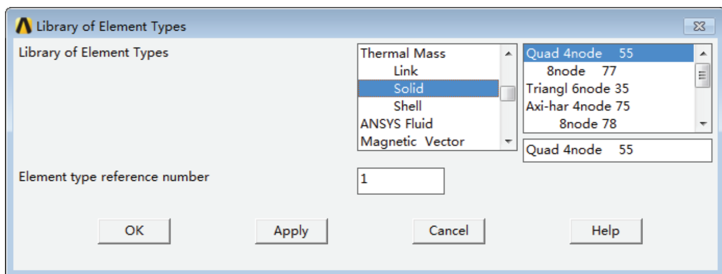


图 9-5 Library of Element Types 对话框

在 Element Types 对话框中，选中 Type 1，单击 Options 按钮，如图 9-6 所示，弹出图 9-7 所示的 PLANE55 element type options 对话框，K3 项选择 Plane，单击 OK 按钮，在 Element Types 对话框中单击 Close 按钮。

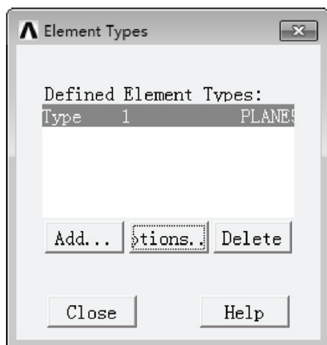


图 9-6 Element Types 对话框

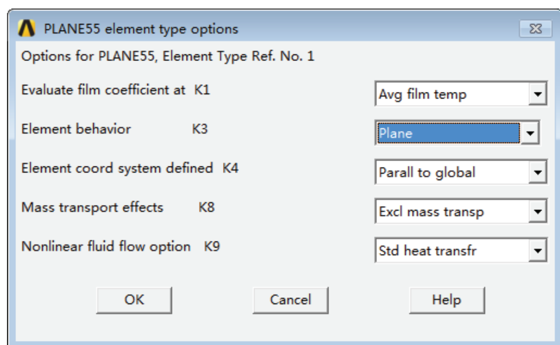


图 9-7 PLANE55 element type options 对话框

（3）定义参数。在命令窗口输入以下参数定义：

R1=4.125E-3
R2=4.635E-3
Q=8.73E8
T0=127
AP=10000

（4）定义材料属性。

1）定义铀燃料的导热系数。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框，如图 9-8 所示。

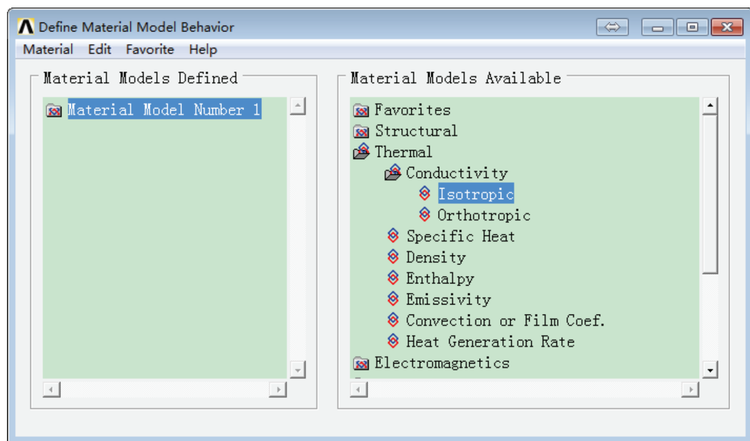


图 9-8 Define Material Model Behavior 对话框

选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，弹出 Conductivity for Material Number 1 对话框，在 KXX 项输入 2.6，如图 9-9 所示，单击 OK 按钮。

2）定义锆锡合金的导热系数。在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，保留默认设置，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 2 的定义。



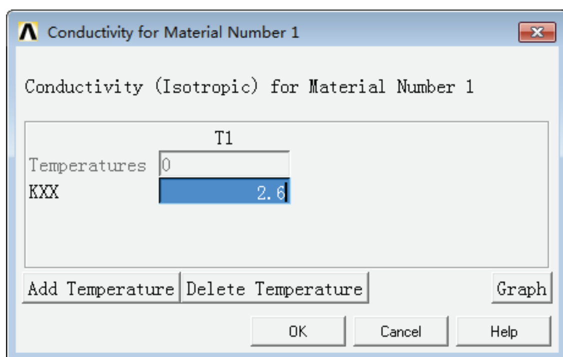


图 9-9 Conductivity for Material Number 1 对话框

选中 Material Model Number 2，在右侧执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，弹出 Conductivity for Material Number 2 对话框，在 KXX 文本框中输入 17.2，单击 OK 按钮。

定义完材料参数后，关闭材料属性定义对话框。

（5）建立几何模型。

1）建立铀燃料模型。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→By Dimensions 菜单命令，弹出图 9-10 所示的 Circular Area by Dimensions 对话框，RAD1 项设为 R1，RAD2 项缺省，THETA1 项设为 0，THETA2 项设为 90，单击 Apply 按钮。

2）建立锆锡合金模型。继续将 RAD1 项设为 R2，RAD2 项缺省，THETA1 项设为 0，THETA2 项设为 90，单击 OK 按钮。

（6）几何模型布尔操作。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All，拾取所有模型。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，在弹出的对话框中选中 Area，执行 Utility Menu→Plot→Replot 菜单命令，所得各面的编号如图 9-11 所示。

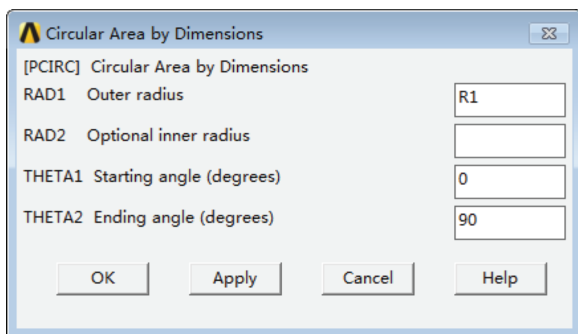


图 9-10 Circular Area by Dimensions 对话框

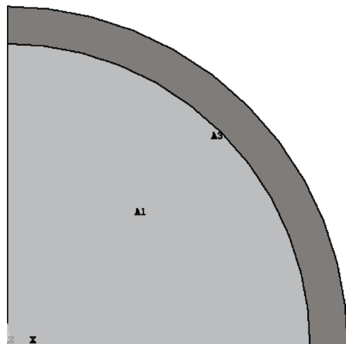


图 9-11 建立模型示意图

（7）赋予模型材料和单元属性。

1）设置铀燃料材料和单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，用鼠标左键拾取 1 号面，弹出

图 9-12 所示的 Area Attributes 对话框，MAT 项和 TYPE 项分别选择 1 和 1 PLANE55，单击 OK 按钮。

提示：如果不确定 1 号面的位置，可以在 Area Attributes 对话框的文本框中输入“1”，如图 9-13 所示，按〈Enter〉键确认，再单击 OK 按钮，同样可以选中 1 号面。

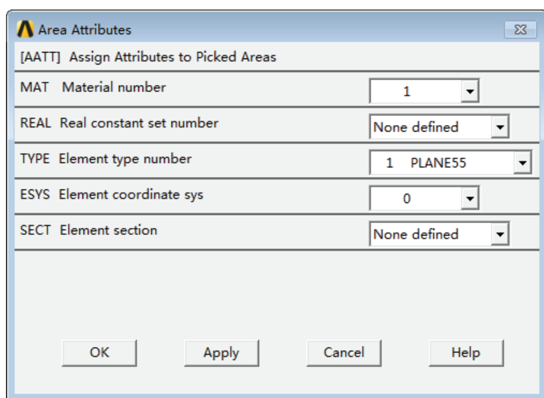


图 9-12 Area Attributes 对话框 1

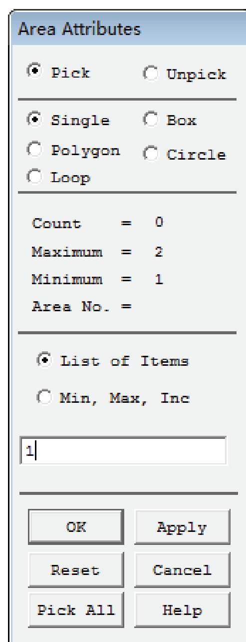


图 9-13 Area Attributes 对话框 2

2）设置锆锡合金材料和单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areasaes 菜单命令，弹出面拾取对话框，用鼠标左键拾取 3 号面，在弹出的 Area Attributes 对话框中，MAT 和 TYPE 项分别选择 2 和 1 PLANE55，单击 OK 按钮。

（8）设置单元密度。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，在弹出的 Global Element Sizes 对话框中，SIIE 项设为 0.003，如图 9-14 所示，单击 OK 按钮。

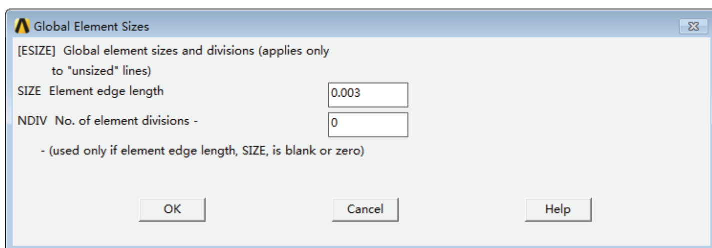


图 9-14 Global Element Sizes 对话框

（9）划分单元。

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Target Surf 菜单命令，选择 Pick All，生成有限元模型，如图 9-15 所示。

（10）施加温度边界条件。

1）施加铀燃料热生成载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Heat Generate→On Areas 菜单命令，拾取 1 号面，单击 OK 按钮，弹出图 9-16 所示的 Apply HGEN on areas 对话框，将 VALUE 项设为 Q，单击 OK 按钮。

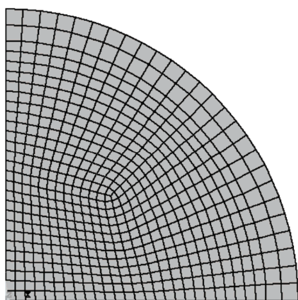


图 9-15　建立有限元模型

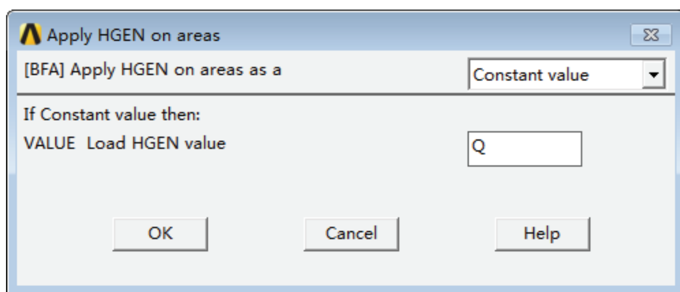


图 9-16　Apply HGEN on areas 对话框

2）设置锆锡合金外表面对流换热。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，拾取图形最右侧的 4 号线，如图 9-17 所示，单击 OK 按钮，弹出 Apply CONV on lines 对话框，将 VAL1 项设为 AP，VAL2 项设为 T0，如图 9-18 所示，单击 OK 按钮。

提示：同样，如果不确定 4 号线的位置，可以在线拾取对话框的文本框中输入“4”，按〈Enter〉键确认，再单击 OK 按钮，同样可以选中 4 号线。

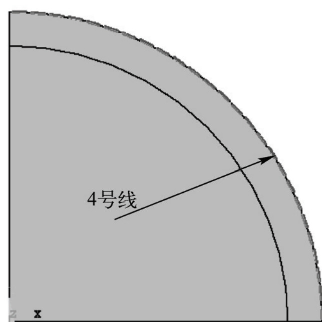


图 9-17　锆锡合金外表面线示意图

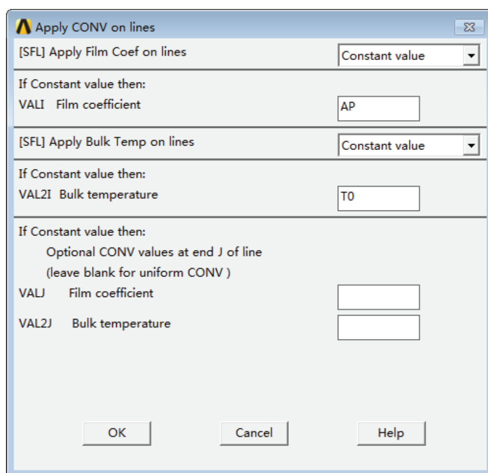


图 9-18　Apply CONV on lines 对话框

（11）设置求解选项。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Steady-State 单选按钮，如图 9-19 所示，单击 OK 按钮。

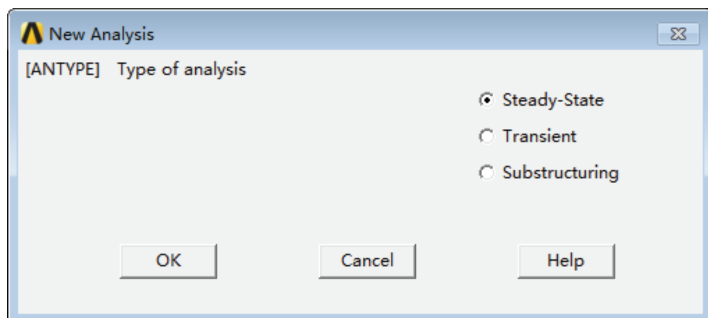


图 9-19 New Analysis 对话框

（12）设置温度偏移。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Static or Steady-state Analysis 对话框，将 TOFFST 项设为 273，其他保留默认设置，如图 9-20 所示，单击 OK 按钮。

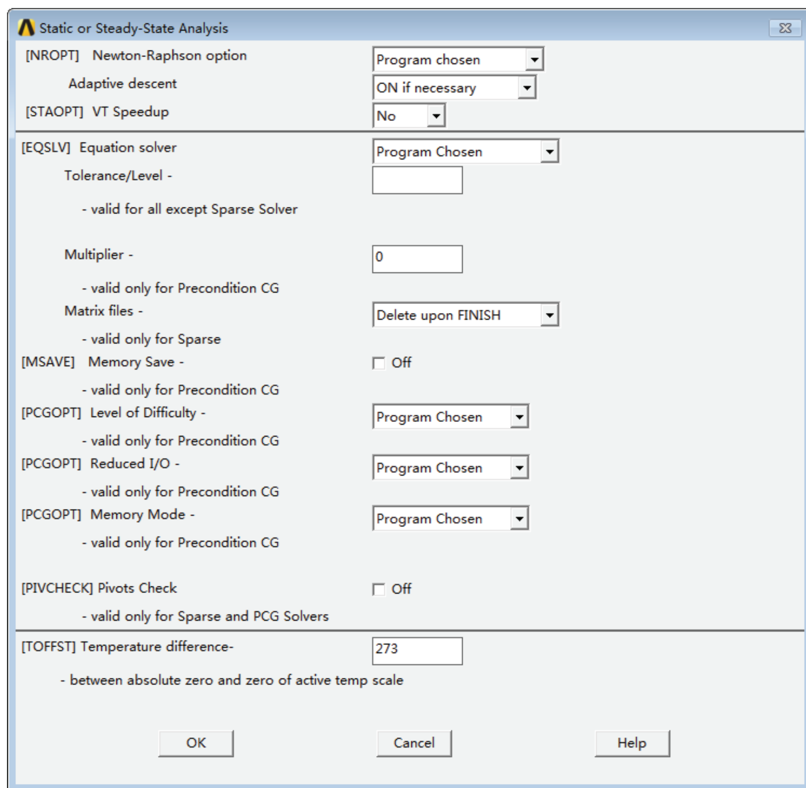


图 9-20 Static or Steady-State Analysis 对话框

（13）输出控制。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，将 Time at end of loadstep 项设为 1，其他保留默认设置，如

图 9-21 所示，单击 OK 按钮。

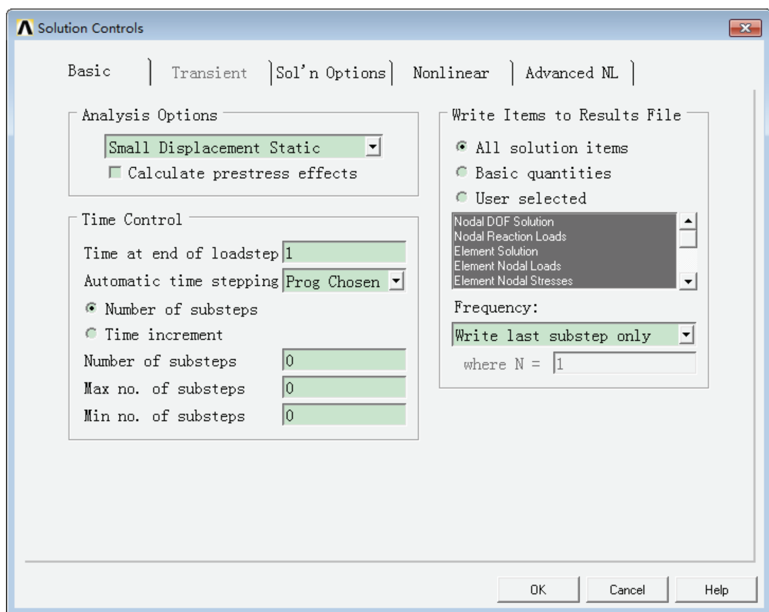


图 9-21　Solution Controls 对话框

（14）存盘。执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS Toolbar 中的 Save_DB 按钮。

（15）求解。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 STATUS Command 窗口和 Solve Current Load Step 对话框，如图 9-22 和图 9-23 所示。审核 STATUS Command 文件中的模型信息，确认后，单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮，程序开始计算。

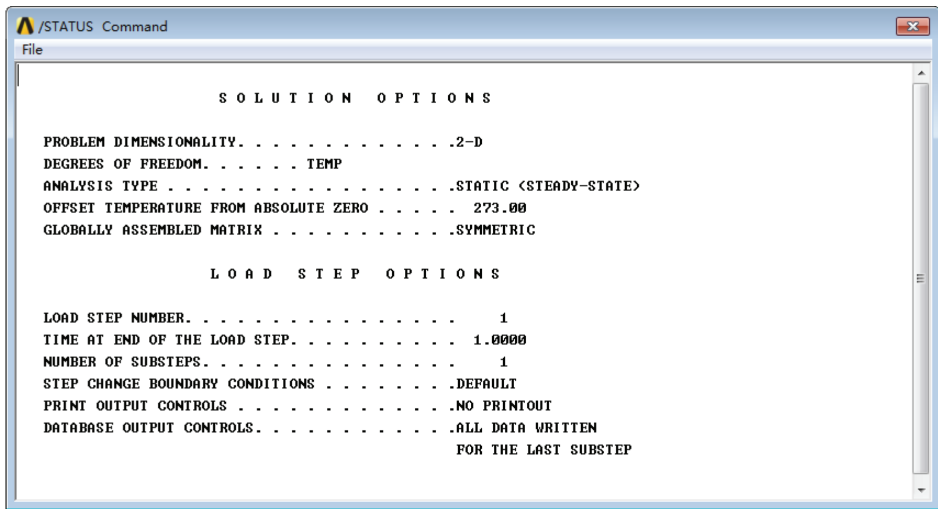


图 9-22　STATUS Command 窗口

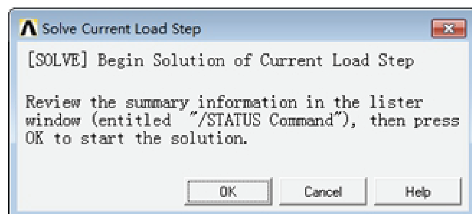


图 9-23 Solve Current Load Step 对话框

计算完成后，程序弹出图 9-24 所示的 Note 对话框，提示计算完成。单击 Close 按钮关闭计算窗口，并进行存盘。

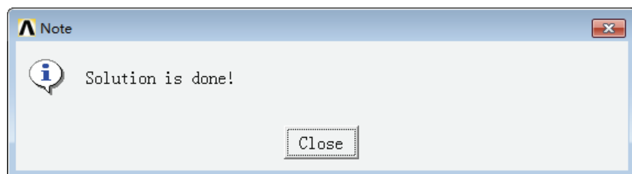


图 9-24 Note 对话框

（16）显示沿路径温度分布。

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

1）定义径向路径。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，拾取模型上 Y=0 的所有节点，如图 9-25 所示，单击 OK 按钮，弹出 By Nodes 对话框。将 Name 项设为 R1，其他取默认值，如图 9-26 所示，单击 OK 按钮，弹出图 9-27 所示的路径列表，显示路径 R1，节点数为 29。

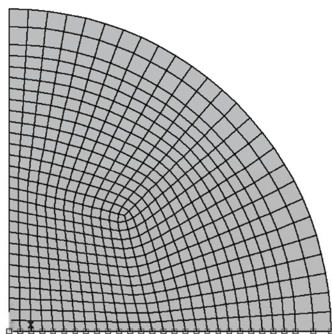


图 9-25 沿径向路径拾取的节点

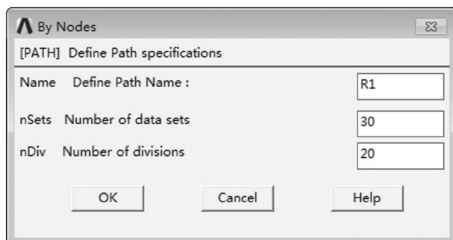


图 9-26 By Nodes 对话框

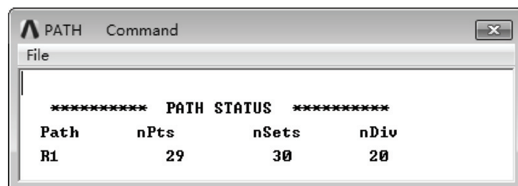


图 9-27 PATH Command 列表窗口

2）将温度场分析结果映射到路径上。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path 菜单命令，弹出 Map Result Items onto Path 对话框，将 Lab 项设为映射标签 TR1，Item，Comp Item to be mapped 项选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，如图 9-28 所示，单击 OK 按钮，完成温度值到路径 R1 上的映射。

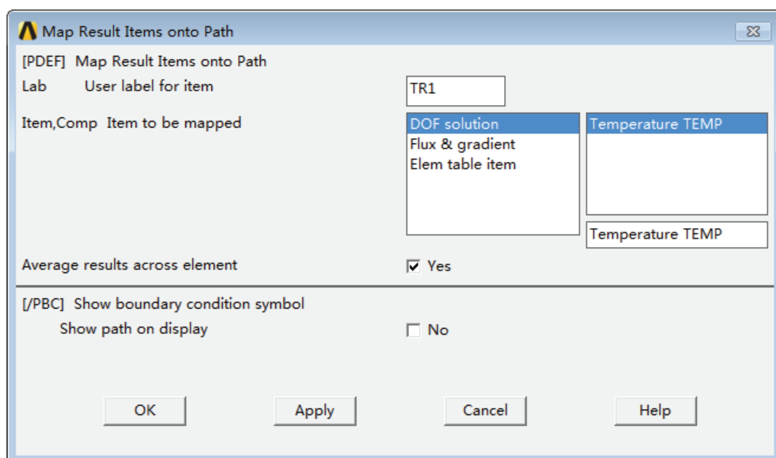


图 9-28　Map Result Items onto Path 对话框

3）显示沿路径温度分布曲线。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Graph 菜单命令，弹出 Plot of Path Items on Graph 对话框，Lab1-6 项选择 TR1，如图 9-29 所示，单击 OK 按钮，得到图 9-30 所示的沿路径的温度分布曲线。

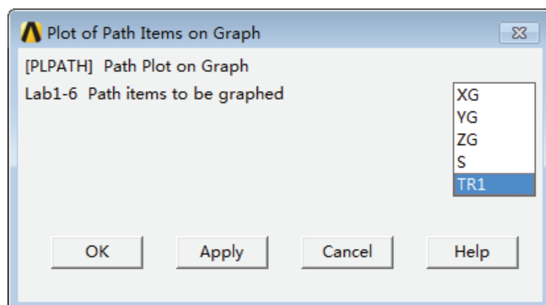


图 9-29　Plot of Path Items on Graph 对话框图

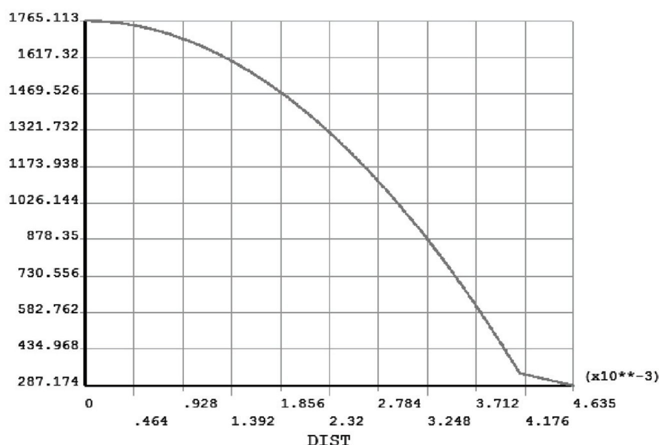


图 9-30　沿路径 R1 的温度分布曲线变化图

4）显示沿径向路径温度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Geometry 菜单命令，弹出 Plot of Path Items on Geometry 对话框，Item 项选择 TR1，其他保持默认设置，如图 9-31 所示，单击 OK 按钮，得到温度沿径向的温度分布云图如图 9-32 所示。

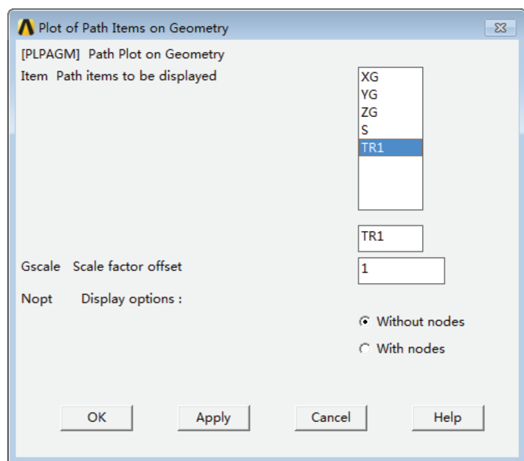


图 9-31　Plot Path Items on Geometry 对话框

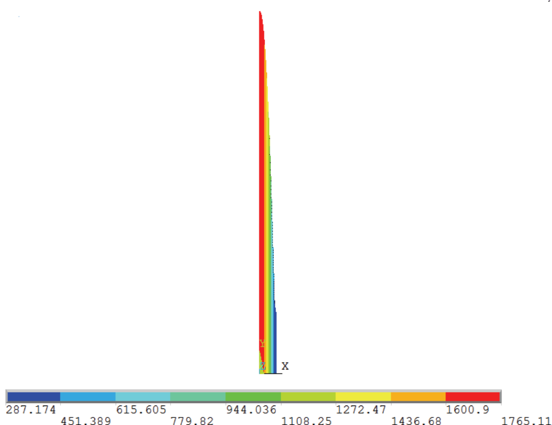


图 9-32　沿径向的温度分布云图

（17）显示温度分布云图。

1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INFO 项选择 Legend ON，如图 9-33 所示，单击 OK 按钮。

2）执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 下选中 Nodal Temperature 选项，如图 9-34 所示，单击 OK 按钮，所得温度分布云图如图 9-35 所示。

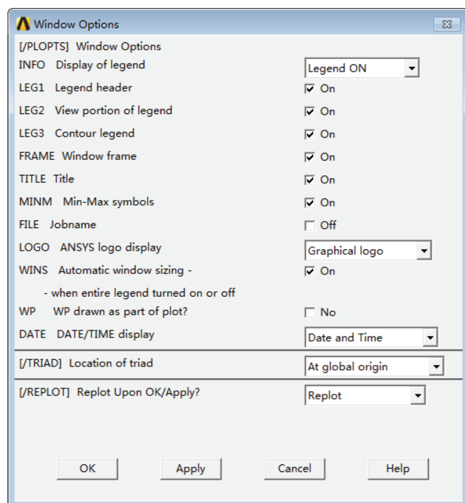


图 9-33　Window Options 对话框

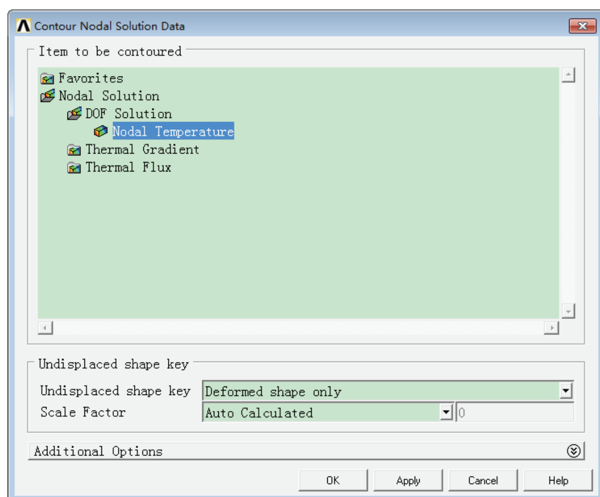


图 9-34　Contour Nodal Solution Data 对话框

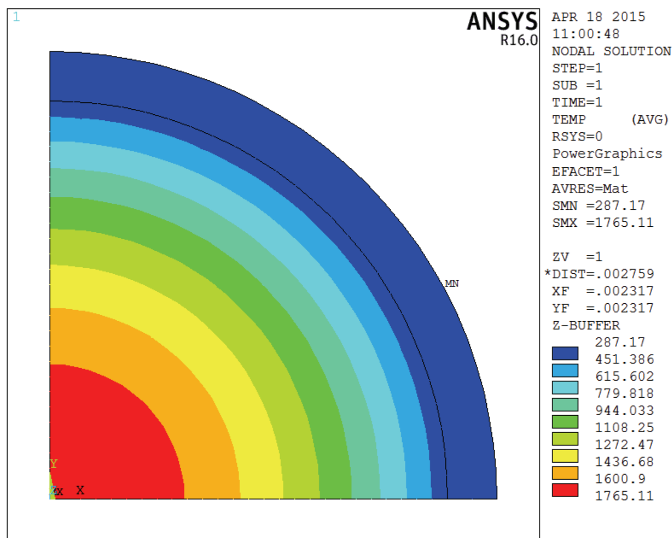


图 9-35　铀燃料管的温度分布云图

（18）获取铀燃料中心位置节点温度值。

1）确定节点编号。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，在弹出的对话框中依次选中 Nodes，By Num/Pick，From Full，如图 9-36 所示，单击 OK 按钮，弹出 Select nodes 对话框，如图 9-37 所示，拾取模型上原点处的节点，单击 OK 按钮，选中该节点。



图 9-36　Select Entities 对话框

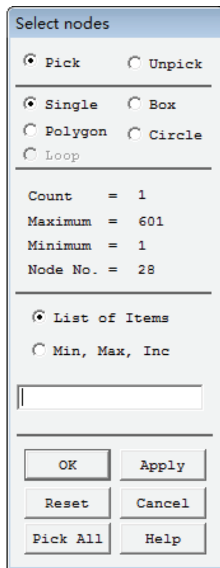


图 9-37　Select nodes 对话框

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，选中 NODE 项，如图 9-38 所示，单击 OK 按钮。执行 Utility Menu→Plot→Nodes 菜单命令，确定铀燃料中心处的节点编号为 28。

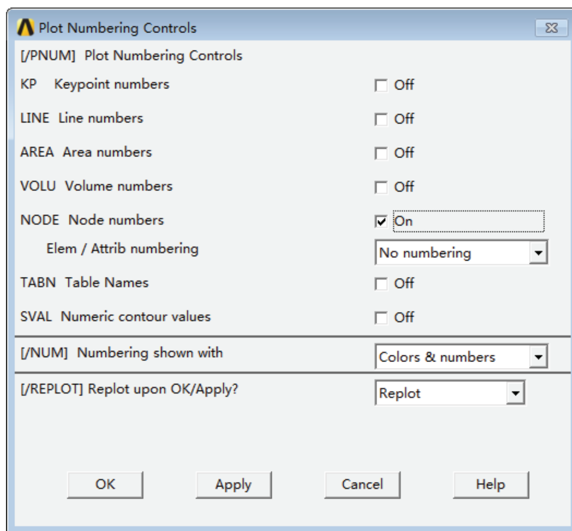


图 9-38 Plot Numbering Controls 对话框

2）获取铀燃料中心位置节点温度。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，如图 9-39 所示。在 Type of data to be retrieved 列表框中选择 Results data 和 Nodal results，单击 OK 按钮，弹出 Get Nodal Results Data 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 RTC，Node number N 项设为 28，在 Results data to be retrieved 列表框中选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，如图 9-40 所示，单击 OK 按钮。

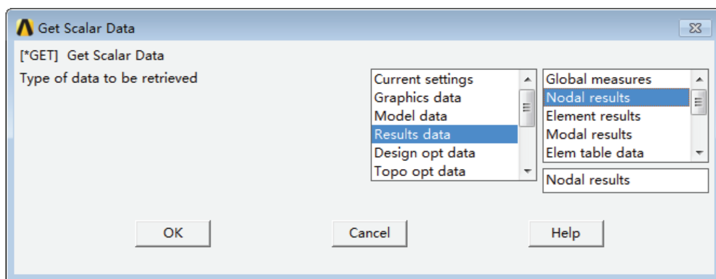


图 9-39 Get Scalar Data 对话框

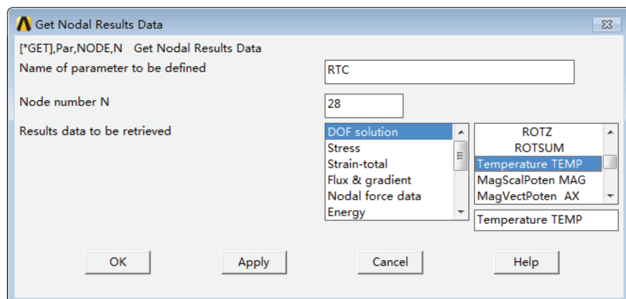


图 9-40 Get Nodal Results Data 对话框

（19）获取锆锡合金圆管外表面节点温度值。

1）确定节点编号。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，在弹出的对话框中分别选中 Nodes，By Num/Pick 和 From Full，选择模型上 Y=0，锆锡合金外表面上一点。再执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，选中 NODE 项，执行 Utility Menu→Plot→Nodes 菜单命令，确定节点编号为锆锡合金管外表面节点编号为 548 的节点。

2）获取锆锡合金管外表面节点温度。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框。依次选择 Results data 和 Nodal results，弹出 Get Nodal Results Data 对话框，将 Name of parameter to be defined 项设为 RT1，Node number N 项设为 548，在 Results data to be retrieved 列表框中选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，单击 OK 按钮。

（20）获取锆锡合金管外表面节点热流率。

1）选取锆锡合金管外表面单元。执行 Utility Menu→Select→Entility 菜单命令，在弹出的对话框中依次选中 Line，By Num/Pick 和 From Full，单击 OK 按钮，拾取图 9-17 所示的 4 号线，单击 OK 按钮。执行 Utility Menu→Select→Entility 菜单命令，在弹出的对话框中依次选择 Nodes，Attached to，Lines,all 和 From Full，单击 Apply 按钮，如图 9-41 所示，选择锆锡合金管外表面的所有节点。

继续在对话框中选择 Elements，Attached to 和 Nodes，如图 9-42 所示，单击 OK 按钮，选取锆锡合金管外表面单元。

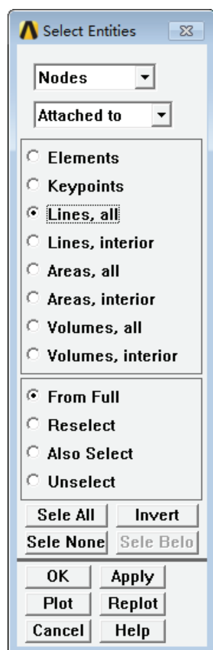


图 9-41 选取锆锡合金管外表面节点

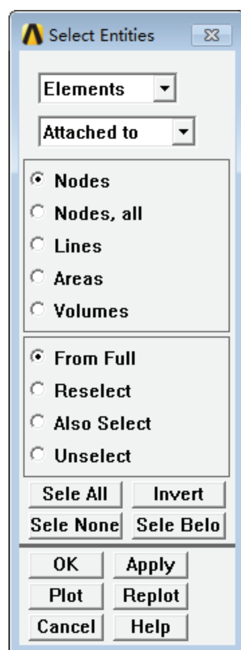


图 9-42 选取锆锡合金管外表面单元

2）建立锆锡合金管外表面单元组。执行 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table 菜单命令，弹出 Element Table Data 对话框，如图 9-43 所示，单击 Add 按钮，

弹出图 9-44 所示的 Define Additional Element Table Items 对话框，将 Lab 项设为 HT1，在 Item，Comp 列表框中选择 Nodal force data 和 Heat flow HEAT，如图 9-44 所示，单击 OK 按钮。单击 Close 关闭 Element Table Data 对话框。

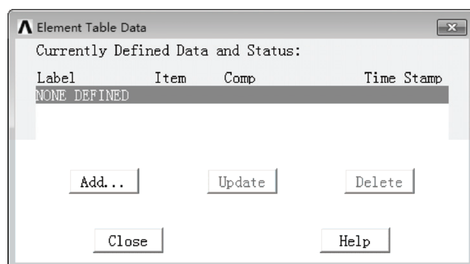


图 9-43 Element Table Data 对话框

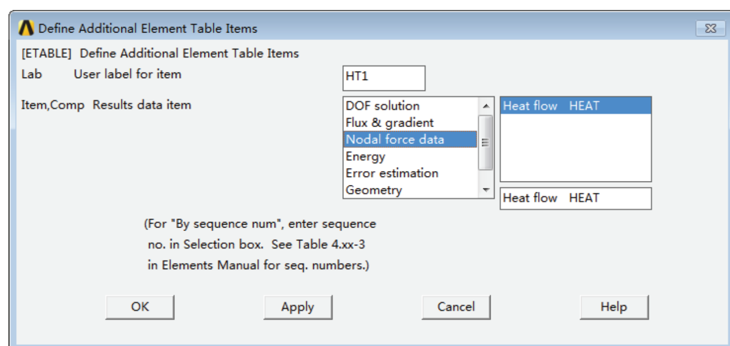


图 9-44 Define Additional Element Table Items 对话框

3）执行 Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of each Item 菜单命令，弹出 Tabular Sum of Each Element Table Item 对话框，如图 9-45 所示，单击 OK 按钮。弹出 SSUM Command 窗口，如图 9-46 所示。显示单元数组各项相加之和，代表模型中单位长度散热量为 11659.7 W。

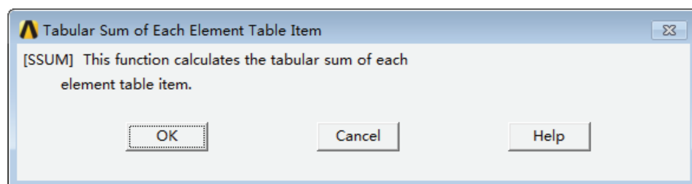


图 9-45 Tabular Sum of Each Element Table Item 对话框

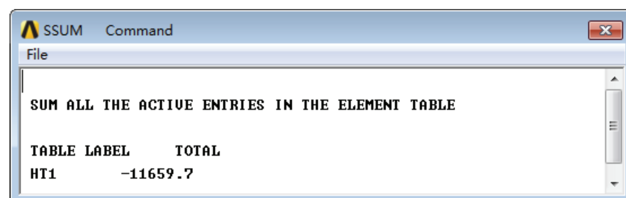


图 9-46 SSUM Command 窗口

4）提取热流率值。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出图 9-47 所示的 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中依次选择 Results data 和 Elem table sums，单击 OK 按钮，弹出图 9-48 所示的 Get Element Table Sum Results 对话框，将 Name of parameter to be defined 项设为 HT，Element table item 项选择 HT1，单击 OK 按钮。

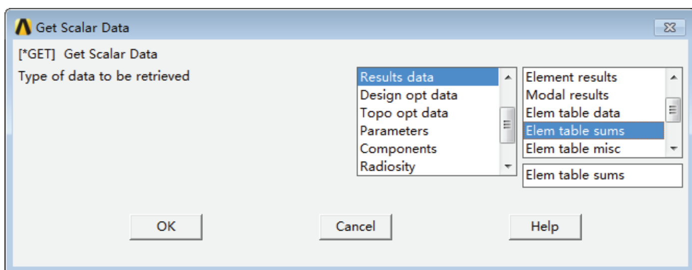


图 9-47　Get Scalar Data 对话框

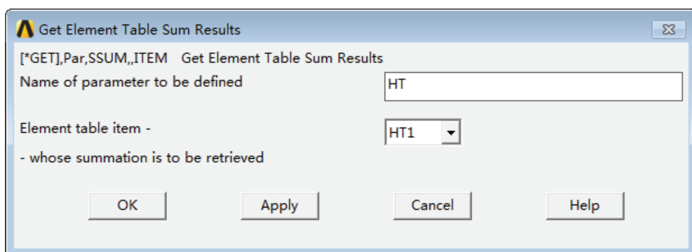


图 9-48　Get Element Table Sum Results 对话框

（21）计算有限元分析结果与理论值误差。在命令窗口中输入以下命令：

```
PI=3.1415926
QL=Q*PI*R1**2*1                 !理论散热量
RTL=T0+QL/(2*PI*R2*1*AP)        !锆锡合金外表面理论计算温度
QS= -HT*4                       !有限元计算散热量
QER=1-QL/QS                     !计算热流率损失误差
TER=1- RTL / RT1                !计算外表面计算温度误差
```

（22）列出各参数值。

执行 Utility Menu→List→Status→Parameters→All Parameters 菜单命令，列出所有的参数，如图 9-49 所示。可以看出，铀燃料管最高温度为 1765 ℃，锆锡合金管外壁面温度为 287 ℃。单位长度管外散热量为 46 638 W，采用二维平面有限元分析与理论值的误差，温度误差为 0.02%，散热量误差为 0.06%。

2．进行三维分析

（1）清除数据库。在图 9-50 所示的工具栏中单击 New Analysis 按钮，弹出 New Analysis 对话框，如图 9-51 所示，在 Current Analysis Information 选项组中选中 Save no information 单选按钮，在 New Analysis Information 选项组中，在 Analysis jobname 文本框中输入“Exercise9-2”，单击 OK 按钮。

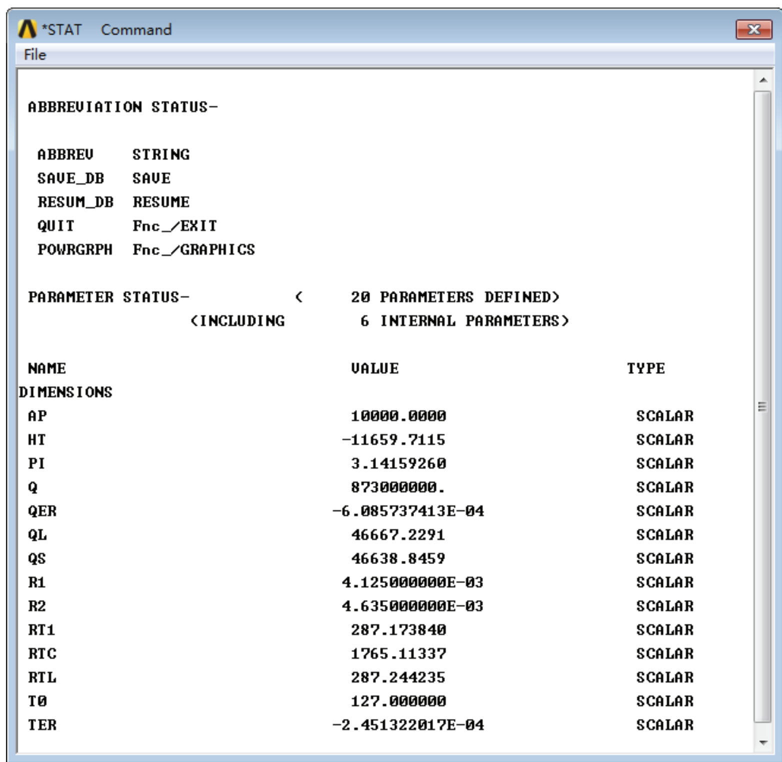


图 9-49 各参数值列表



图 9-50 工具栏

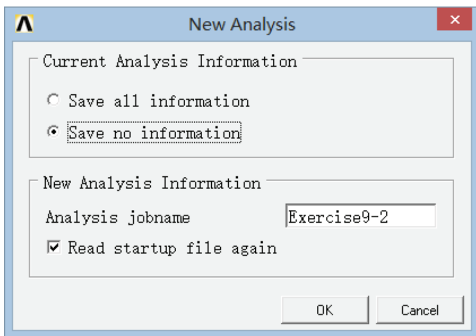


图 9-51 New Analysis 对话框

（2）定义单元类型。执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Thermal Solid 和 Brick 8node 70，选择 8 节点六面体单元，如图 9-52 所示，单击 OK 按钮，单击 Element Types 对话框的 Close 按钮，关闭单元增添对话框。

（3）定义参数。在命令窗口中输入以下参数：

```
R1=4.125E-3
R2=4.635E-3
L=10E-3
```



Q=8.73E8
T0=127
AP=10000

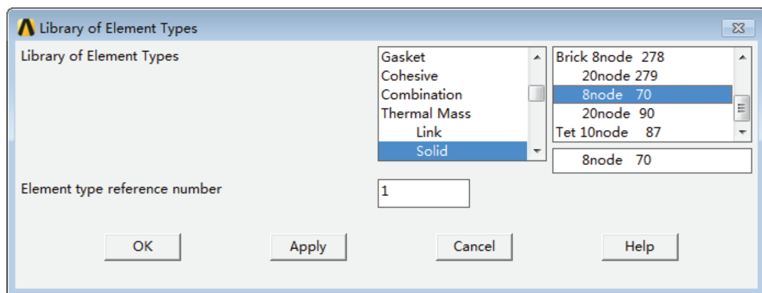


图 9-52 Library of Element Types 对话框

（4）定义材料属性。

1）定义铀燃料的导热系数。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，定义 1 号材料的导热系数。将 KXX 项设为 2.6，单击 OK 按钮。

2）定义锆锡合金管的导热系数。在 Define Material Model Behavior 对话框中执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认设置，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 2 的定义。

选中 Material Model Number 2，在右侧执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，定义 2 号材料的导热系数，将 KXX 项设为 17.2，单击 OK 按钮。定义完材料参数后，关闭材料属性定义对话框。

（5）建立几何模型。

1）建立铀燃料圆柱体。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Cylinder by Dimensions 对话框，RAD1、RAD2、Z1、Z2、THETA1、THETA2 项分别设为 R1、0、0、L、0、90，如图 9-53 所示，单击 Apply 按钮，建立 1/4 圆柱模型。

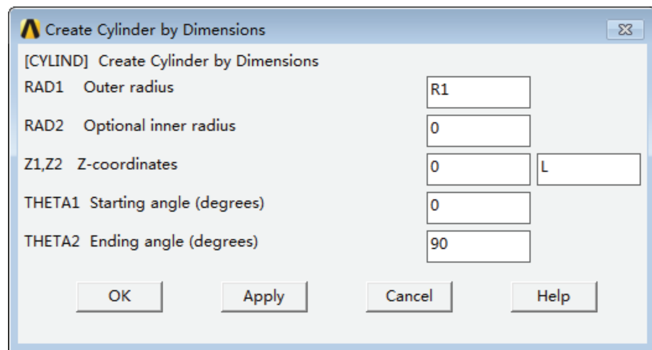


图 9-53 Create Cylinder by Dimensions 对话框

2）建立锆锡合金管圆柱体。在 Create Cylinder by Dimensions 对话框中，将 RAD1、RAD2、Z1、Z2、THETA1、THETA2 项分别设为 R2、0、0、L、0、90，单击 OK 按钮。

（6）几何模型的布尔操作。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Volumes 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮，选中所有模型。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，在弹出的对话框中选中 Volume，执行 Utility Menu→Plot→Replot 菜单命令，所得模型如图 9-54 所示。

（7）赋予模型单元和材料属性。

1）设置铀燃料材料和单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes 菜单命令，弹出体拾取对话框，用鼠标左键拾取 1 号体，弹出图 9-55 所示的 Volumes Attributes 对话框，MAT 和 TYPE 项分别选择 1 和 1 SOLID70，单击 OK 按钮。

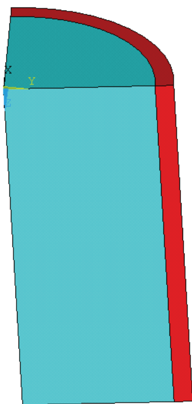


图 9-54　几何模型图

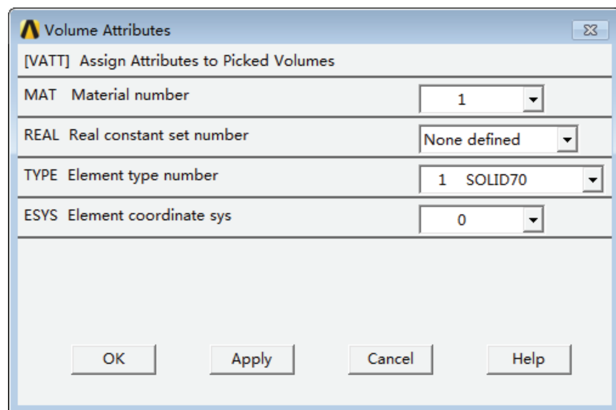


图 9-55　Volume Attributes 对话框

2）设置锆锡合金材料和单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes 菜单命令，弹出体拾取对话框，用鼠标左键拾取 3 号体，在弹出的 Volume Attributes 对话框中，MAT 和 TYPE 项分别选择 2 和 1 SOLID70，单击 OK 按钮。

（8）设置单元密度。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，Element edge length 项设为 0.003，单击 OK 按钮。

（9）划分单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→4 to 6 Sided 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮，拾取所有模型，所得有限元模型如图 9-56 所示。

（10）施加边界条件。

1）施加铀燃料热生成率载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Heat Generate→On Volumes 菜单命令，拾取 1 号体，单击 OK 按钮，弹出 Apply HGEN on Volumes 对话框，将 VALUE 项设为 Q，单击 OK 按钮。

2）施加锆锡合金管外表面对流换热边界。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→

Apply→Thermal→Convection→On Areas 菜单命令，拾模型最外侧的圆弧面，即 8 号面，如图 9-57 所示，单击 OK 按钮，弹出 Apply CONV on Areas 对话框，将 VAL1 项设为 AP，VAL2 项设为 T0，单击 OK 按钮。

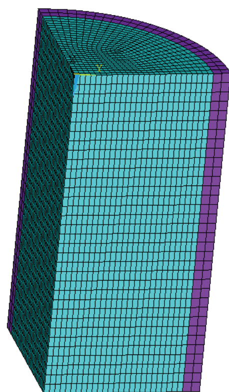


图 9-56　所得有限元模型

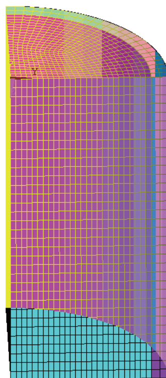


图 9-57　锆锡合金管外表面拾取示意图

提示：在选取面时，也可以通过在面拾取对话框中直接输入“8”，按〈Enter〉键确认，再单击 OK 按钮。

（11）设置求解选项。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Steady-State，单击 OK 按钮。

（12）设置温度偏移。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Static or Steady Analysis 对话框，将 TOFFST 项设为 273，其他保留默认设置，单击 OK 按钮。

（13）输出控制。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，将 Time at end of loadstep 项设为 1，其他保留默认设置，单击 OK 按钮。

（14）求解。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 STATUS Command 和 Solve Current Load Step 对话框。审核 STATUS Command 文件中的模型信息，确认后单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮，程序开始计算。

（15）存盘。执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS Toolbar 中的 Save_DB 按钮。

（16）显示沿路径温度分布。

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

1）定义径向路径。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，拾取模型上 Y=0,Z=0 的所有节点，如图 9-58 所示，

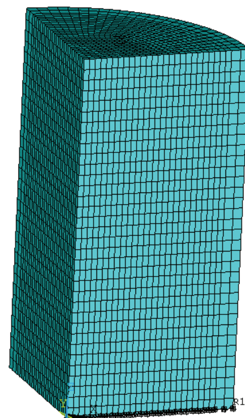


图 9-58　径向路径示意图

单击 OK 按钮，弹出路径定义对话框，将 Name 项设为 R1，其他取默认值，单击 OK 按钮，弹出路径列表，显示路径 R1，节点数 29。

2）将温度场分析结果映射到径向路径上。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path 菜单命令，弹出 Map Result Items onto Path 对话框，将 Lab 项设为映射标签 TR1，在 Item、Comp 列表框中选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，单击 OK 按钮，完成温度值到路径 R1 的映射。

3）显示沿路径温度分布曲线。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Graph 菜单命令，弹出 Plot Path Items on Graph 对话框，Lab1-6 项选择 TR1，单击 OK 按钮，得到图 9-59 所示的沿路径 R1 的温度分布曲线图。

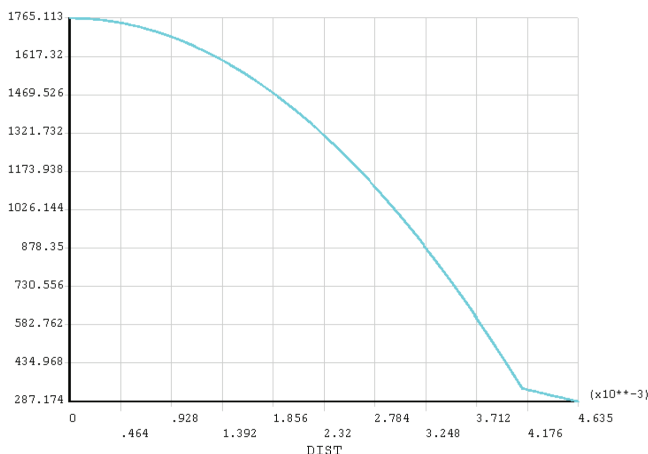


图 9-59　沿路径 R1 的温度分布曲线图

4）显示沿路径温度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Geometry 菜单命令，弹出 Plot Path Items on Geometry 对话框，Item Path items to be displayed 项选择 TR1，其他保留默认设置，单击 OK 按钮，沿径向的温度分布云图如图 9-60 所示。

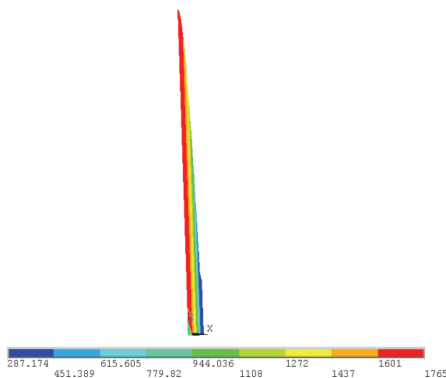


图 9-60　沿径向的温度分布云图

（17）显示温度分布云图。

1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INFO 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

2）执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 下选中 Nodal Temperature，单击 OK 按钮。所得温度分布如图 9-61 所示。

3）将 1/4 模型扩展至圆柱整体。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Symmetry Expansion→Periodic/Cyclic Symmetry 菜单命令，弹出 Periodic/Cyclic Symmetry 对话框，选择 1/4 Dihedral Sym，单击 OK 按钮。扩展的温度分布云图 9-62 所示。

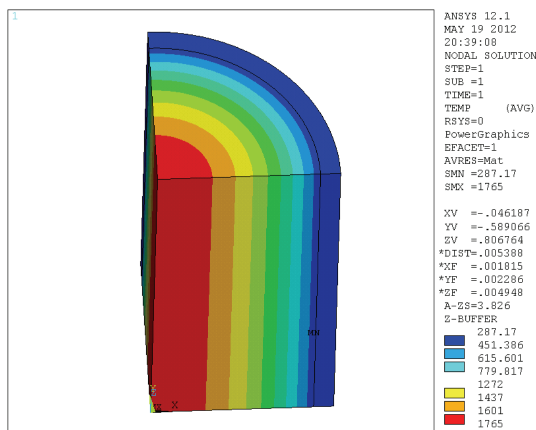


图 9-61 铀燃料管温度分布云图

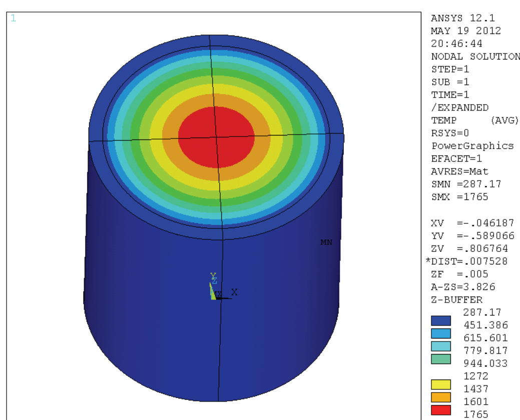


图 9-62 铀燃料管的扩展温度分布云图

（18）获取铀燃料中心节点温度值。

1）确定节点编号。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，在弹出的对话框中依次选中 Nodes，By Num/Pick 和 From Full，选择模型上原点处的节点。再执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，在 Plot Numbering Controls 对话框中选中 NODE 项，执行 Utility Menu→Plot→Replot 菜单命令，确定铀燃料中心处编号为 1 的节点。

2）获取铀燃料中心处节点温度。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框。将 Name of parameter to be defined 项设为 RTC，Node number N 项设为 1，在 Results data to be retrieved 列表框中选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，单击 OK 按钮。

（19）获取锆锡合金圆管外表面节点温度值。

1）确定节点编号。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，在弹出的对话框中依次选中 Nodes，By Num/Pick 和 From Full，选择模型上 Y=0，锆锡合金外表面节点。再执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，在 Plot Numbering Controls 对话框选中 NODE 项，执行 Utility Menu→Plot→Replot 菜单命令，确定节点编号为锆锡合金管外表面节点编号为 19146 的节点。

2）获取锆锡合金管外表面节点温度。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜

单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框。将 Name of parameter to be defined 项设为 RT1，Node number N 项设为 19146，在 Results data to be retrieved 列表框中选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，单击 OK 按钮。

提示：模型中铀燃料中心处的 1 号节点和锆锡合金管外表面的 19146 号节点的位置示意图如图 9-63 所示。

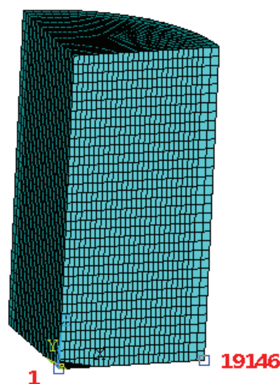


图 9-63 1 号节点和 19146 号节点位置示意图

（20）获取锆锡合金管外表面节点热流率。

1）选取锆锡合金管外表面单元。执行 Utility Menu→Select→Entility 菜单命令，在弹出的对话框中依次选中 Area，By Num/Pick 和 From Full，单击 OK 按钮，弹出面拾取对话框，在对话框中输入“8”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Entility 菜单命令，在弹出的对话框中依次选择 Nodes，Attached to，Areas,all 和 From Full，单击 Apply 按钮，如图 9-64 所示，选择外表面的所有节点。

继续在对话框中选择 Elements，Attached to 和 Nodes，如图 9-65 所示，单击 OK 按钮，选取锆锡合金外表面单元。

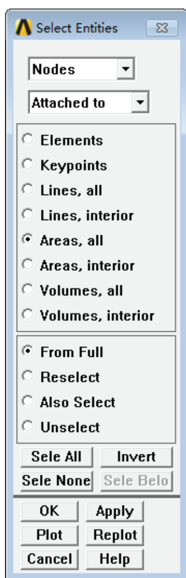


图 9-64 选取锆锡合金管外表面节点

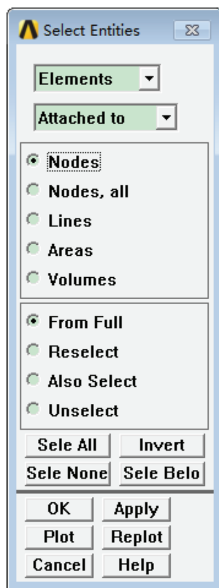


图 9-65 选取锆锡合金管外表面单元

2）建立锆锡合金外表面单元组。执行 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table 菜单命令，在弹出的 Element Table Data 对话框中单击 Add 按钮，弹出图 9-66 所示的 Define Additional Element Table Items 对话框，将 Lab 项设为 HT1，在 Item，Comp 列表框中选择 Nodal force data 和 Heat flow HEAT，单击 OK 按钮。单击 Close 按钮关闭 Element Table Data 对话框。

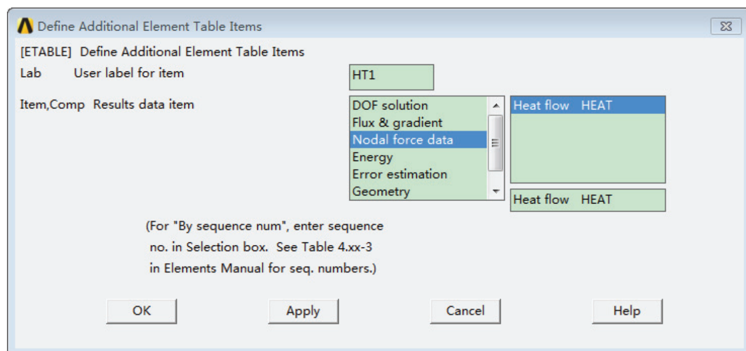


图 9-66　Define Additional Element Table Items 对话框

3）执行 Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of each Item 菜单命令，在弹出的 Tabular sum of Each Element Table Item 对话框中，单击 OK 按钮。弹出 SSUM Command 对话框，显示单元数组各项之和，代表模型中散热量为 116.597 W。关闭 SSUM Command 对话框。

4）提取热流率值。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，在 Type of data to be retrieved 列表框中依次选择 Results data 和 Elem table sums，如图 9-67 所示，单击 OK 按钮，弹出图 9-68 所示的 Get Element Table Sum Results 对话框，将 Name of parameter to be defined 项设为 HT，Element table item 项选择 HT1，单击 OK 按钮。

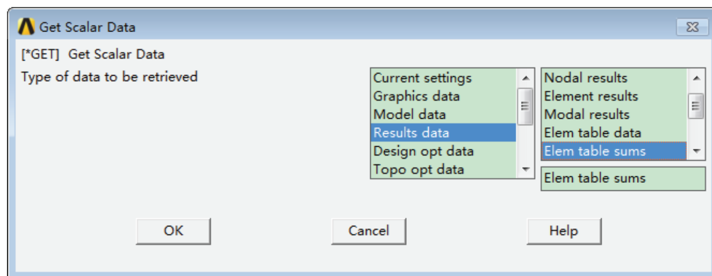


图 9-67　Get Scalar Data 对话框

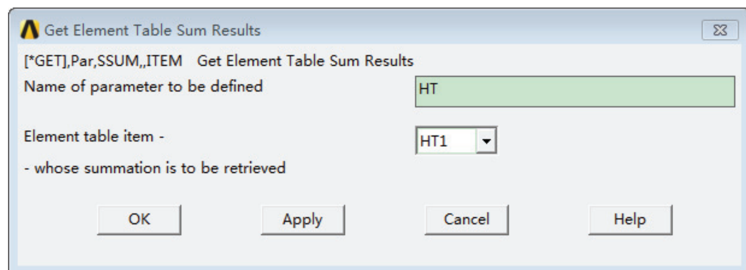


图 9-68　Get Element Table Sum Results 对话框

（21）计算有限元分析结果与理论值误差。在命令窗口输入：

```
PI=3.1415926
QL=Q*PI*R1**2*1                    !理论散热量
RTL=T0+QL/(2*PI*R2*1*AP)           !锆锡合金外表面理论计算温度
QS= -HT*4/L                        !有限元计算散热量
QER=1-QL/QS                        !计算热流率损失误差
TER=1- RTL / RT1                   !计算外表面计算温度误差
```

（22）列出各参数值。

执行 Utility Menu→List→Status→Parameters→All Parameters 菜单命令，列出所有的参数，如图 9-69 所示。可以看出，铀燃料管最高温度为 1765 ℃，锆锡合金管外壁面温度为 287 ℃。单位长度管外散热量为 46 638 W，采用三维有限元分析与理论值的误差，温度误差为 0.02%，散热量误差为 0.06%。

```
*STAT Command
File

ABBREVIATION STATUS-

 ABBREV    STRING
 SAVE_DB   SAVE
 RESUM_DB  RESUME
 QUIT      Fnc_/EXIT
 POWRGRPH  Fnc_/GRAPHICS

PARAMETER STATUS-          (     18 PARAMETERS DEFINED)
                 (INCLUDING       3 INTERNAL PARAMETERS)

NAME                            VALUE                      TYPE  DIMENSIONS
AP                               10000.0000                  SCALAR
HT                              -116.597114                  SCALAR
L                                1.000000000E-02             SCALAR
PI                               3.14159260                  SCALAR
Q                                873000000.                  SCALAR
QER                             -6.085778235E-04             SCALAR
QL                               46667.2291                  SCALAR
QS                               46638.8457                  SCALAR
R1                               4.125000000E-03             SCALAR
R2                               4.635000000E-03             SCALAR
RT1                              287.173846                  SCALAR
RTC                              1765.11345                  SCALAR
RTL                              287.244235                  SCALAR
T0                               127.000000                  SCALAR
TER                             -2.451106138E-04             SCALAR
```

图 9-69　各参数值列表

（23）保存并退出程序。单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

9.3.4 APDL 命令流程序

```
!========== ======第一步：进行二维轴对称分析====================
FINISH
/FILNAME,Exercise9-1
/PREP7                                       !进入前处理器
R1=4.125E-3
R2=4.635E-3
Q=8.73E8
T0=127
AP=10000                                     !定义参数
ET,1,PLANE55                                 !定义单元类型
```

```
KEYOPT,1,3,0                               !设置为平板分析
MP,KXX,1, 2.6                              !定义铀燃料的热传导系数
MP,KXX,2, 17.2                             !定义锆锡合金的热传导系数
PCIRC,R1,0,0,90,                           !建立 90 度铀燃料
PCIRC,R2,0,0,90,                           !建立 90 度锆锡合金
AOVLAP,ALL                                 !对面进行搭接操作
ASEL,S,,,1
AATT,1,,1                                  !设置铀燃料的单元属性
ASEL,S,,,3
AATT,2,,1                                  !设置锆锡合金的单元属性
ALLSEL,ALL
ESIZE,0.0003,0,                            !定义单元划分尺寸
MSHKEY,2                                   !设置映射单元划分选项
AMESH,ALL                                  !划分单元
BFA,1,HGEN,Q                               !施加热生成载荷
SFL,4,CONV,AP, ,T0,                        !在 4 号线施加对流换热边载荷
FINISH
/SOLU                                      !进入求解器
ANTYPE,STATIC                              !设置为稳态求解
TOFFST,273,                                !设置温度偏移
TIME,1                                     !定义求解时间
SOLVE                                      !求解
FINISH
/POST1                                     !进入后处理器
SET,LAST                                   !读入最后子步结果
ALLSEL,ALL
FLST,2,29,1
FITEM,2,28
FITEM,2,54
FITEM,2,55
FITEM,2,56
FITEM,2,57
FITEM,2,58
FITEM,2,59
FITEM,2,60
FITEM,2,61
FITEM,2,62
FITEM,2,63
FITEM,2,64
FITEM,2,65
FITEM,2,66
FITEM,2,67
FITEM,2,68
FITEM,2,69
FITEM,2,70
FITEM,2,71
```



```
FITEM,2,72
FITEM,2,73
FITEM,2,74
FITEM,2,75
FITEM,2,76
FITEM,2,77
FITEM,2,78
FITEM,2,1
FITEM,2,576
FITEM,2,548
PATH,R1,29,30,20,                     !建立径向路径
PPATH,P51X,1
PATH,STAT
PDEF,TR1,TEMP, ,AVG                   !向所定义路径映射温度分析结果
PLPATH,TR1                            !显示沿路径温度变化的曲线图
PLPAGM,TR1,1,Blank                    !在几何模型上显示径向温度分布云图
PLNSOL, TEMP,, 0                      !显示温度分布云图
*GET,RTC,NODE,28,TEMP,                !提取铀燃料中心节点温度
*GET,RT1,NODE,548,TEMP,               !提取锆锡合金外表面节点温度
LSEL,S, , ,       4                   !选择锆锡合金外表面线
NSLL,S,1                              !选择锆锡合金外壁面节点
ESLN,S                                !选择锆锡合金外壁单元
ETABLE,HT1,HEAT,                      !建立锆锡合金外表面单元组
SSUM                                  !计算模型热损失
*GET,HT,SSUM, ,ITEM,HT1               !提取模型热损失值
PI=3.1415926
QL=Q*PI*R1**2*1                       !理论散热量
RTL=T0+QL/(2*PI*R2*1*AP)              !锆锡合金外表面理论计算温度
QS=-HT*4                              !单位长度有限元计算散热量
QER=1-QL/QS                           !计算热流率损失误差
TER=1- RTL / RT1                      !计算外表面计算温度误差
*STAT                                 !列表所有参数
!=====================第二步：进行三维分析=========================
FINISH
/CLEAR,START                          !清理数据库
/FILNAME,Exercises9-2,0               !定义隐式热分析文件名
/PREP7                                !进入前处理器
ET,1,SOLID70                          !选择单元类型
R1=4.125E-3
R2=4.635E-3
L=10E-3
Q=8.73E8
T0=127
AP=10000                              !定义参数
MP,KXX,1, 2.6                         !定义铀燃料的热传导系数
MP,KXX,2, 17.2                        !定义锆锡合金的热传导系数
```

```
CYLIND,R1,0,0,L,0,90,                 !建立 1/4 铀燃料管三维几何模型
CYLIND,R2,0,0,L,0,90,                 !建立 1/4 铀燃料管三维几何模型
VOVLAP,ALL                            !对体进行搭接操作
VSEL,S , , ,        1
VATT,        1, ,    1,        0      !设置铀燃料的单元属性
VSEL, S, , ,        3
VATT,        2, ,    1,        0      !设置锆锡合金的单元属性
ALLSEL,ALL
ESIZE,0.0003,0,                       !设置单元划分尺寸
MSHKEY,1                              !设置映射划分单元类型
VMESH,ALL                             !划分单元
BFV,1,HGEN,Q                          !施加热生成载荷
SFA,8, ,CONV,AP,T0                    !施加对流换热边界条件
/SOLU                                 !进入求解器
ANTYPE,STATIC                         !设置为稳态求解
TOFFST,273,                           !设置温度偏移
TIME,1                                !定义求解时间
SOLVE                                 !求解
FINISH
/POST1                                !进入后处理器
SET,LAST                              !读入最后子步结果
FLST,2,29,1
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,8
FITEM,2,9
FITEM,2,10
FITEM,2,11
FITEM,2,12
FITEM,2,13
FITEM,2,14
FITEM,2,15
FITEM,2,16
FITEM,2,17
FITEM,2,18
FITEM,2,19
FITEM,2,20
FITEM,2,21
FITEM,2,22
FITEM,2,23
FITEM,2,24
FITEM,2,25
```

```
FITEM,2,26
FITEM,2,27
FITEM,2,2
FITEM,2,19182
FITEM,2,19146
PATH,R1,29,30,20,                          !建立径向路径
PPATH,P51X,1
PATH,STAT
PDEF,TR1,TEMP, ,AVG                        !向所定义的路径映射温度分析结果
PLPATH,TR1                                 !显示沿路径温度变化的曲线图
PLPAGM,TR1,1,Blank                         !在几何模型上显示径向温度分布云图
PLNSOL, TEMP,, 0                           !显示温度分布云图
/EXPAND,4,POLAR,HALF,,90                   !设置三维周期扩展选项
*GET,RTC,NODE,1,TEMP,                      !提取铀燃料中心节点温度
*GET,RT1,NODE,19146,TEMP,                  !提取锆锡合金外表面节点温度
ASEL,S, , ,        8                       !选择锆锡合金外表面面
NSLA,S,1                                   !选择锆锡合金外壁节点
ESLN,S                                     !选择锆锡合金外壁单元
ETABLE,HT1,HEAT,                           !建立锆锡合金外表面单元组
SSUM                                       !计算模型热损失
*GET,HT,SSUM, ,ITEM,HT1                    !提取模型热损失值
PI=3.1415926
QL=Q*PI*R1**2*1                            !理论散热量
RTL=T0+QL/(2*PI*R2*1*AP)                   !锆锡合金外表面理论计算温度
QS= -HT*4/L                                !单位长度有限元计算散热量
QER=1-QL/QS                                !计算热流率损失误差
TER=1- RTL / RT1                           !计算外表面计算温度误差
*STAT                                      !列表所有参数
/EXIT,NOSAV                                !退出 ANSYS
```

9.4 本章小结

稳态热分析是 ANSYS 热分析中是最基础的一部分，本章简单介绍了稳态热分析的基本理论和 ANSYS 稳态热分析的基本思路，并通过一个简单的工程实例详细讲述了采用 ANSYS 进行稳态热分析的操作步骤和应用技巧。

第 10 章　瞬态热分析

瞬态热分析用于计算一个系统随时间变化的温度及其他热参数。本章主要介绍了瞬态热分析的基本理论，采用 ANSYS 进行瞬态热分析的边界条件和求解选项的设置，以及使用 ANSYS 进行瞬态热分析的基本思路和操作步骤，并通过一些典型工程应用实例，详细介绍瞬态热分析的基本思路及前后处理的应用技巧。

学习目标：

（1）理解瞬态热分析基本理论；

（2）掌握 ANSYS 进行瞬态热分析的边界条件和求解选项的设置；

（3）掌握瞬态热分析的基本方法及基本操作步骤、命令。

10.1　瞬态热分析概述

10.1.1　瞬态热分析特性

瞬态热分析用于计算一个系统随时间变化的温度及其他热参数。在工程上一般用瞬态热分析计算温度场，并将之作为热载荷进行应力分析。

瞬态热分析的基本步骤与稳态热分析类似，瞬态热分析中使用的单元与稳态热分析相同，主要的区别是瞬态分析中的载荷是随时间变化的。“时间”在稳态分析中只用于计数，而在瞬态热分析中有了明确的物理意义。

在稳态热分析中，单元的热能储存效应被忽略，在瞬态热分析中则被考虑进去。涉及相变的分析总是瞬态分析，将在后面的章节作具体讨论。

为了表达随时间变化的载荷，首先必须将载荷－时间曲线分为载荷步。载荷－时间曲线中的每一个拐点为一个载荷步，如图 10-1 所示。对于每一个载荷步，必须定义载荷值及时间值，同时选择载荷步为渐变或阶跃。图 10-1a 为初始载荷为 0，并通过渐变和阶跃两种方式施加了 5 个载荷步的情况；图 10-1b 为以稳态分析得到的初始温度载荷为初始载荷，并通过渐变和阶跃两种方式施加了 5 个载荷步的情况。

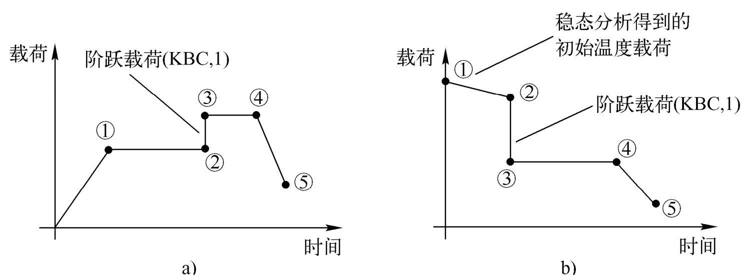


图 10-1　载荷与时间变化曲线示意图

“时间”在静态和瞬态分析中都用做步进参数。每个载荷步和子步都与特定的时间相联系，尽管求解本身可能不随速率变化。

像稳态分析一样，瞬态分析也可以是线性或非线性的，两者的主要区别在于加载和求解的过程。除了导热系数（K）外，瞬态分析中还要考虑材料的密度（ρ）和比热容（C），材料特性应包含实体传递和储存热能的材料特性参数。还可以定义热焓（H），用于相变分析中。

这些材料用于计算每个单元的热存储性质并叠加到比热容矩阵（C）中。如果模型中有热质量交换，这些特性用于确定热传导矩阵（K）的修正项。

10.1.2 控制方程

热存储项的计入将静态分析转变为瞬态系统，矩阵形式见下式：

$$(C)\{\dot{T}\}+(K)\{T\}=\{Q\} \tag{10-1}$$

式中，$(C)\{\dot{T}\}$ 为热存储项。

在瞬态分析中，载荷随时间变化时：

$$(C)\{\dot{T}\}+(K)\{T\}=\{Q(t)\} \tag{10-2}$$

对于非线性瞬态分析：

$$(C(T))\{\dot{T}\}+(K(T))\{T\}=\{Q(T,t)\} \tag{10-3}$$

10.1.3 时间积分与时间步长预测

线性热系统温度变化由常数连续变化为另外的常数，对于热瞬态分析，使用时间积分在离散的时间点上计算系统方程。求解之间时间的变化称为时间积分步（ITS）。通常情况下，ITS 越小，计算结果越精确。

默认情况下，自动时间步功能（ATS）按照振动幅度预测时间步。ATS 将振动幅度限制在公差为 0.5 之内并调整 ITS 以满足准则要求。

稳态分析可以迅速地变为瞬态分析，只要在后续载荷步中将时间积分效果打开。同样，瞬态分析也可以转变为稳态分析，只要在后续载荷步中将时间积分效果关闭。可见，从求解方法来说，瞬态分析和稳态分析的差别就在于时间积分。

确定时间步长的方法有两种：

（1）先指定一个相对保守的初始时间步长，然后使用自动时间步长增加时间步。

（2）大致估计初始时间步长。

在瞬态分析中大致估计初始时间步长，可以使用 Biot 数（即 Bi）和 Fourier 数（即 Fo）。Biot 数是不考虑尺寸的热阻对流和传导比例因子：

$$Bi=\frac{h\Delta x}{K} \tag{10-4}$$

式中，Δx 是名义单元宽度，h 是平均对流换热系数，K 是平均导热系数。

Fourier 数是不考虑尺寸的时间（$\Delta t/t$）：

$$Fo=\frac{K\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2} \tag{10-5}$$

式中，ρ 和 c 是平均的密度和比热。

如果 Bi<1，可以将 Fourier 数设为常数并求解 Δt 来预测时间步长：

$$\Delta t=\beta\frac{\rho c(\Delta x)^2}{K}=\beta\frac{(\Delta x)^2}{\alpha} \quad (10\text{-}6)$$

$$\alpha=\frac{K}{\rho c} \quad (10\text{-}7)$$

式中，α 表示热耗散。比较大的 α 数值表示材料容易导热而不容易储存热能。并且，$0.1\leqslant\beta\leqslant0.5$。

如果 Bi>1，时间步长可以用 Fourier 数和 Biot 数的乘积预测：

$$Fo\bullet Bi=\left(\frac{K\Delta t}{\rho c\left(\Delta x\right)^2}\right)\left(\frac{h\Delta x}{K}\right)=\left(\frac{h\Delta t}{\rho c\Delta x}\right)=\beta \quad (10\text{-}8)$$

$$\Delta t=\beta\frac{\rho c\Delta x}{h} \quad (10\text{-}9)$$

式中，$0.1\leqslant\beta\leqslant0.5$。

时间步长的预测精度随单元宽度的取值、平均的方法和比例因子β而变化。

对于瞬态分析，在热梯度较大的区域（如淬火体的表面），热流方向的最大单元尺寸和能够得到好结果的最小时间步长有一种联系：在时间步保持不变的时候，更多的单元通常会得到更好的结果；但是，在网格尺寸不变的时候，子步越多，结果反而会变得更差。

当采用自动时间步和代中间节点的二次单元时，ANSYS 建议使用者根据输入的荷载来控制最大的时间步长。

根据下面的关系来定义最小的时间步长：

$$ITS=\Delta^2/4\alpha \quad (10\text{-}10)$$

其中 Δ 为在热梯度最大处沿热流方向的单元长度，α 为扩散率，它等于导热系数除以密度与比热的乘积（$\alpha=\kappa/\rho c$）。

当采用有中间节点的单元时，如果违反上述关系式，ANSYS 的计算会出现不希望的振荡，计算出的温度会在物理上超出可能的范围。如果不采用带中间节点的单元，则一般不会计算出振荡的温度分布，那么上述建议的最小时间步长就有些保守。

不要采用特别小的时间步长，特别是当建立初始条件时。在 ANSYS 中，很小的数可能导致计算错误，比如当一个问题的时间量级为秒的时候，时间步长为 1×10^{-10} 时就可能产生数值错误。

10.1.4 数值求解过程

当前温度向量｛T_n｝假设为已知，可以是初始温度或由前面稳态分析的求解得到。定义下一个时间点的温度向量：

$$\left\{T_{n+1}\right\}=\left\{T_n\right\}+(1-\theta)\Delta t\left\{\dot{T}_n\right\}+\theta\Delta t\left\{\dot{T}_{n+1}\right\} \quad (10\text{-}11)$$

式中，θ 成为欧拉参数，默认为 1。下一个时间点的温度：

$$(C)\left\{\dot{T}_{n+1}\right\}+(K)\left\{T_{n+1}\right\}=\{Q\} \quad (10\text{-}12)$$

由式（10-11）和（10-12）可得：

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}(C)+(K)\right)\{T_{n+1}\}=\{Q\}+(C)\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\{T_n\}+\frac{1-\theta}{1}\{\dot{T}_n\}\right) \quad (10-13)$$

$$[\bar{K}]\{T_{n+1}\}=\{\bar{Q}\} \quad (10-14)$$

式中：

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}(C)+(K)\right)=(\bar{K}) \quad (10-15)$$

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}\{T_n\}+\frac{1-\theta}{1}\{\dot{T}_n\}\right)=\{\bar{Q}\} \quad (10-16)$$

欧拉参数θ的数值大小在 1/2～1 之间。在这个范围内，时间积分算法是不明显而且不稳定的。因此，ANSYS 总是忽略 ITS 幅值来计算（假设非线性收敛）。但是，计算结果并不总是准确的。选择积分参数时应注意以下两点：

（1）当θ=1/2 时，时间积分方法采用 Crank-Nicolson 技术。本设置对于绝大多数热瞬态问题都是精确有效的。

（2）当θ=1 时，时间积分方法采用 Backward Euler 技术。这是默认的和最稳定的设置，因为它消除了可能带来严重非线性或高阶单元的非正常振动。本技术一般需要相对 Crank-Nicolson 较小的 ITS 得到精确的结果。

10.1.5 初始条件的施加

初始条件必须对模型定义温度自由度，使得时间积分过程得以开始。施加在有温度约束的节点上的初始条件被忽略。根据初始温度域的性质，初始条件可以用以下方法之一指定。

1．施加均匀初始温度

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→Uniform Temp 菜单命令，选择所要施加的节点，弹出图 10-2 所示的 Uniform Temperature 对话框，将 TUNIF 项设为所要施加的均匀温度值。

2．施加非均匀初始温度

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Initial Condit'n→Define 菜单命令，选择所要施加的节点，弹出图 10-3 所示的 Define Initial Conditions 对话框。Lab 项选择 TEMP。

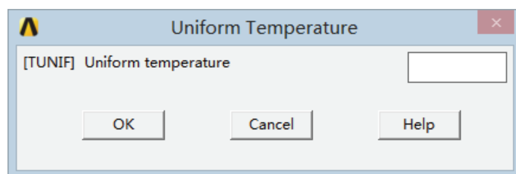


图 10-2 Uniform Temperature 对话框

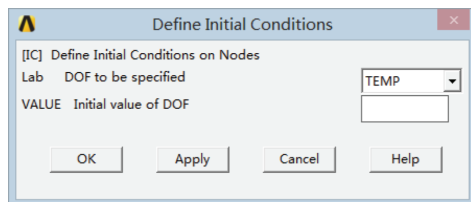


图 10-3 Define Initial Conditions 对话框

当 IC 命令输入后，要使用节点组元名来区分节点。没有定义 DOF 初始温度的节点其初

始温度默认为 TUNIF 命令指定的均匀数值。当求解控制打开时，在指定初始温度前指定 TUNIF 的数值。

3. 由稳态分析得到初始温度

当模型中的初始温度分布是不均匀且未知的，单载荷步的稳态分析可以用来确定瞬态分析前的初始温度。操作步骤如下。

（1）第一载荷步稳态求解。

1）进入求解器，选择瞬态分析类型，并关闭时间积分效果。

2）施加稳态初始载荷和边界条件。

3）为了方便，指定一个很小的结束时间（如 1×10^{-3}s）。不要使用过小的时间数值（如 1×10^{-10}s），因为可能形成数值错误。

4）指定其他所需的控制或设置（如非线性控制）。

5）求解当前载荷步。

提示：如果没有指定初始温度，初始 DOF 数值为 0。

（2）后续载荷步的瞬态求解。

1）时间积分效果保持打开直到后面的载荷步关闭为止。在第二个载荷步中，根据第一个载荷步施加载荷和边界条件。记住删除第一个载荷步中多余的载荷。

2）施加瞬态分析控制和设置。

3）求解之前打开时间积分。

4）求解当前瞬态载荷步。

5）求解后续载荷步。

10.1.6 求解选项的设置

对于瞬态热分析，既可以用多个载荷步完成（对于阶跃或渐变边界条件），也可以只用一个载荷步、采用表格边界条件（对于随时间任意变化的边界条件）并由一个数组参数定义时间点。本节仅对载荷步的方法作介绍，其基本步骤如下。

（1）设定每一载荷步结束时的时间。执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time and Time Step 菜单命令，进行设置。

（2）设定载荷变化方式。如果载荷在这个载荷步是恒定的，需要设为阶越选项；如果载荷值随时间线性变化，则要设定为渐变选项。执行 MainMenu→Preprocessor→Load→Time/Frequenc→Timeand Time Step 菜单命令，进行设置。

（3）定义在本载荷步结束时的载荷数值。

（4）将载荷步信息写入载荷步文件：执行 Main Menu→Preprocessor→Load→Write LS File 菜单命令，进行设置。

（5）对于其他载荷步，重复步骤（1）～（4）即可，直到所有的载荷都已经写到荷载步文件中。

注意：如要删除部分载荷（非温度约束），最好将其设置为在一个微小的时间段中值变为零，而不是直接删除。

10.1.7 瞬态分析准确程度的评估

在瞬态分析中，有许多潜在的错误来源。为评估时间积分算法的准确性，ANSYS 在每步计算后报告以下一些有用的数值。

（1）响应特征值：表示最近载荷步求解的系统特征值。

$$\lambda_r = \frac{\{\Delta T\}^{\mathrm{T}}(K)\{\Delta T\}}{\{\Delta T\}^{\mathrm{T}}(C)\{\Delta T\}} \tag{10-17}$$

式中，$\{\Delta T\}$是温度向量$\{T\}$在最后时间步中的变化，它代表了系统的热能传递和热能存储。它是无单位的时间，并可以将其看作系统矩阵的傅立叶数。

（2）振动极限是无量纲数，是响应特征值和当前时间步长的乘积：

$$f = \Delta t_n \lambda_r \tag{10-18}$$

通常将振动极限限制在 0.5 以下，以保证系统的瞬态响应可以充分反应。

时间积分常数（θ）和振动极限（f）对于时间积分稳定性和精度均有影响。ANSYS 允许用户指定这些参数。

执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time Integration→Newmark Parameters 菜单命令，弹出图 10-4 所示的对话框。THETA 项表示时间积分常数（θ），OSLM 项表示振动极限（f）。若将 THETA 和 OSLM 项设为-1，表示以上两个参数由 ANSYS 自动选择数值。

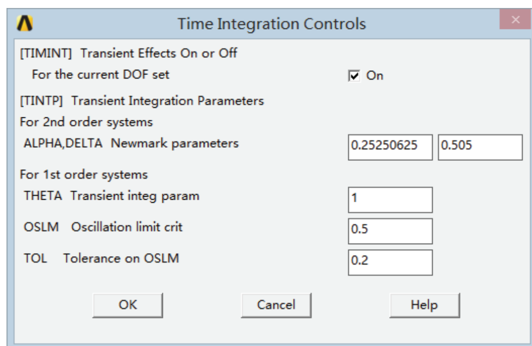


图 10-4　设置时间积分参数

10.2 瞬态热分析基本过程

同稳态分析一样，ANSYS 瞬态热分析也基本可分为 3 个步骤，只是设置不同。

（1）前处理：建模。

（2）求解：施加载荷并计算。

（3）后处理：查看结果。

1．建模

（1）确定 jobname、title、unit。

（2）进入 PREP7 前处理，定义单元类型，设定单元选项。

（3）定义单元实常数。

（4）定义材料热性能参数。对于瞬态热分析，除材料导热系数的定义之外，还需要定义材料的密度和比热容。其数值可以是恒定的，也可以随温度变化。

（5）创建几何模型并划分网格。

2．施加载荷并计算

（1）定义分析类型。

1）如果进行新的热分析，执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，选中 Transient。

2）如果增加边界条件后要继续上一次分析，则执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Restart 菜单命令。

（2）为分析建立初始条件。

瞬态热分析的初始条件来自于为所有节点设定初始温度，或者一个稳态计算结果。初始均匀温度仅对分析的第一个子步有效。

（3）设置其他边界条件和载荷。包括在实体模型或有限元模型上施加温度、热流率、对流、热流密度和热生产率 5 种载荷。

（4）设置载荷步和载荷施加方式。

（5）定义通用选项。

（6）定义非线性选项。

（7）输出控制。

（8）进行计算。

3．后处理

通用后处理和时间历程后处理。

10.3 实例——温度控制加热器工作过程分析

10.3.1 问题描述

某温度控制加热器由一个方形箱体罩住。加热器的比热容为 C1，表面积为 A1，箱体的比热容为 C2，表面积为 A2。箱体的初始温度为 T0，对流换热系数为 h。加热器的工作原理：加热器提供 q 的产热率直至温度达到 Toff，加热器关闭停止供热；当温度降至 Ton 时，加热器打开重新供给为 q 的产热率。试确定加热器和箱体随时间的变化对温度的响应状况。加热器的几何模型如图 10-5 所示，有限元模型如图 10-6 所示。各参数见表 10-1。

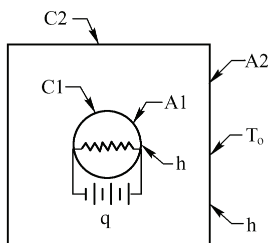


图 10-5　加热器的几何模型

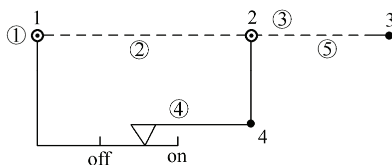


图 10-6　加热器的有限元模型

表 10-1　加热器的材料属性、几何参数及载荷

材料参数	比热容 C1/(J• ℃$^{-1}$)	0.1585
	比热容 C2/(J• ℃$^{-1}$)	1.5852
	对流换热系数 h/ (W• m^{-2}• ℃$^{-1}$)	7
几何参数	面积 A1/m^2	0.76E−3
	面积 A2/m^2	3.87E−3
载荷	加热开始控制温度 T_{on}/℃	37.8
	加热结束控制温度 T_{off}/℃	51.7
	箱体的初始温度 T0/℃	21.1
	热流量 q/W	2.93

10.3.2 问题分析

本例属于热瞬态分析，选用 MASS71、LINK34、COMBIN37 单元进行分析。分析时，温度采用℃，其他均采用国际单位制。

10.3.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise8”，单击 OK 按钮。

2．定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

```
C1=0.1585
C2=1.5852
ALPH=7
A1=0.76E-3
A2=3.87E-3
Ton=37.8
Toff=51.7
T0=21.1
Q=2.93
```

3．定义单元类型

（1）选择热质量单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Thermal Mass 和 3D mass 71，热质量单元，如图 10-7 所示，单击 Apply 按钮。

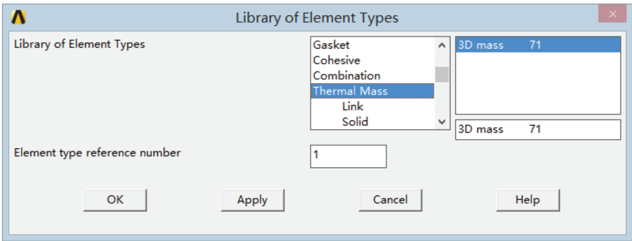


图 10-7　选择热质量单元

（2）选择对流换热单元。选择 Link 和 convection 34，如图 10-8 所示，单击 Apply 按钮。

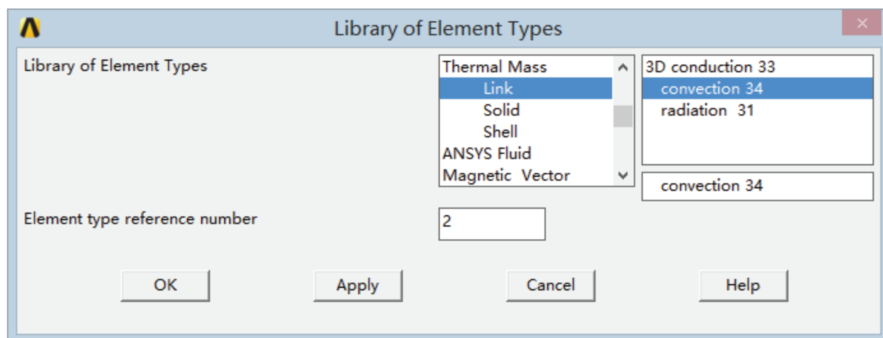


图 10-8 选择对流换热单元

（3）选择控制单元。选择 Combination 和 Control elem 37，如图 10-9 所示，单击 OK 按钮。

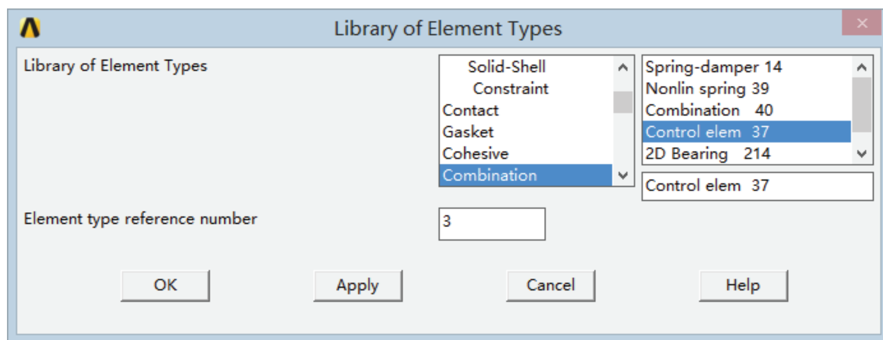


图 10-9 选择控制单元

（4）进行单元设置。在 Element Types 对话框中，选中 Type 1 MASS71，单击 Options 按钮，弹出图 10-10 所示的 MASS71 element type options 对话框，K3 项选中 Therm capacitnce，K4 项选中 NO，单击 OK 按钮。

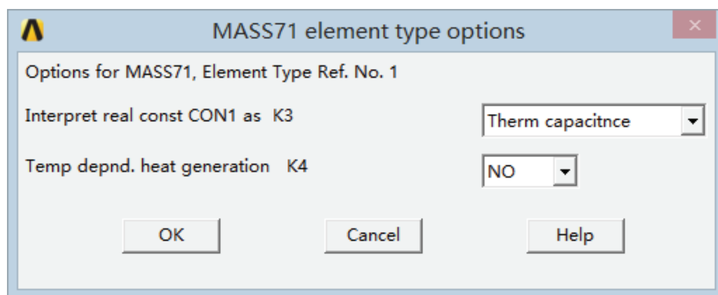


图 10-10 MASS71 element type options 对话框

选中 Type 3 COMBIN37，单击 Options 按钮，弹出图 10-11 所示的 COMBIN37 element type options 对话框，K3 项选中 TEMP，K5 项选中 ON-either-OFF，K6 项选中 Stiffness

STIF，单击 OK 按钮。

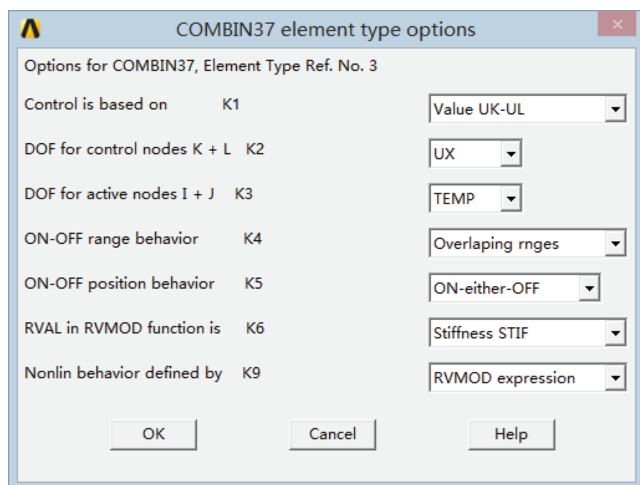


图 10-11 COMBIN37 element type options 对话框

4．定义实常数

（1）定义加热器的热容。执行 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Real Contants 对话框中单击 Add 按钮，弹出图 10-12 所示的 Element Type for Real Constants 对话框，选中 Type 1 MASS71，单击 OK 按钮，弹出 Real Constant and Set Number 1，for MASS71 对话框，如图 10-13 所示。CON1 项设为 C1，单击 Apply 按钮。

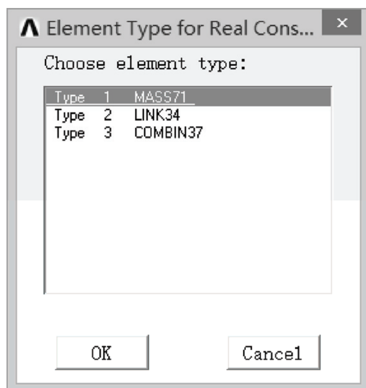


图 10-12 Element Type for Constants 对话框

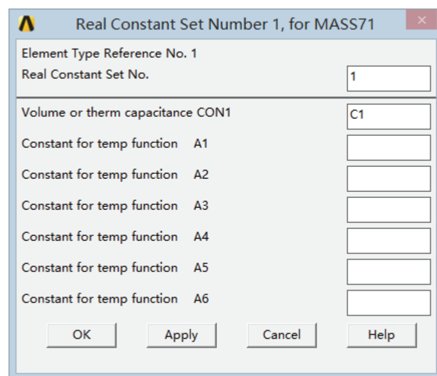


图 10-13 Real Constant and Set Number 1, for MASS71 对话框

（2）定义箱体的热容。将 Real Constant Set No.项设为 2，CON1 项设为 C2，单击 OK 按钮。

（3）定义加热器的表面积。在 Real Contants 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Element Type for Real Constants 对话框，选中 Type 2 LINK34，单击 OK 按钮，弹出 Real Constant and Set Number 3，for LINK34 对话框，如图 10-14 所示。将 AREA 项设为 A1，单击 Apply 按钮。



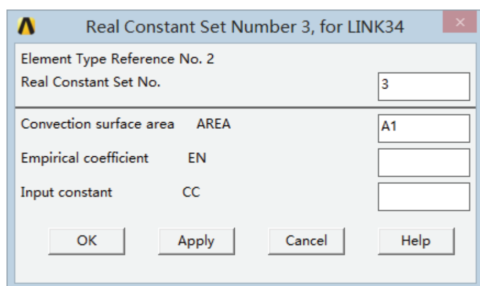

Real Constant Set Number 3, for LINK34
Element Type Reference No. 2
Real Constant Set No. 3
Convection surface area AREA A1
Empirical coefficient EN
Input constant CC
OK Apply Cancel Help

图 10-14 Real Constant and Set Number 3, for LINK34 对话框

（4）定义加热器的表面积。将 Real Constant Set No.设为 4，AREA 项设为 A2，单击 OK 按钮。

（5）定义加热器控制的实常数。在 Real Contants 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Element Type for Real Constants 对话框，选中 Type 3 COMBIN37，单击 OK 按钮，弹出 Real Constant and Set Number 5, for COMBIN37 对话框，如图 10-15 所示。将 ONVAL 项设为 Ton，OFFVAL 项设为 Toff，AFORCE 项设为-Q，START 项设为 1，确定加热器初始为开工作状态，单击 OK 按钮。单击 Close 按钮关闭 Real Contants 对话框。

5．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Thermal→Convection or Film Coef 菜单命令，在弹出的对话框中，将 HF 项设为 ALPH，如图 10-16 所示，单击 OK 按钮。

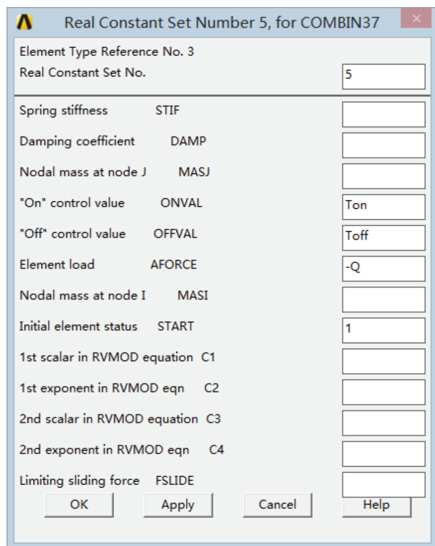

Real Constant Set Number 5, for COMBIN37
Element Type Reference No. 3
Real Constant Set No. 5
Spring stiffness STIF
Damping coefficient DAMP
Nodal mass at node J MASJ
"On" control value ONVAL Ton
"Off" control value OFFVAL Toff
Element load AFORCE -Q
Nodal mass at node I MASI
Initial element status START 1
1st scalar in RVMOD equation C1
1st exponent in RVMOD eqn C2
2nd scalar in RVMOD equation C3
2nd exponent in RVMOD eqn C4
Limiting sliding force FSLIDE
OK Apply Cancel Help

图 10-15 Real Constant and Set Number 5,for COMBIN37 对话框

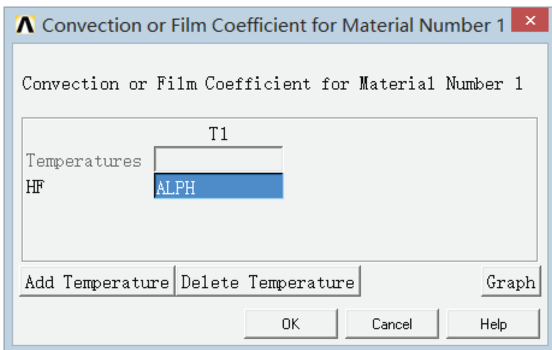


图 10-16 定义对流换热系数

6．建立有限元模型

（1）建立节点。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→In Active

CS 菜单命令，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，如图 10-17 所示。将 NODE 项设为 1，其他项缺省，均默认为 0，单击 OK 按钮。在原点处建立一个节点。

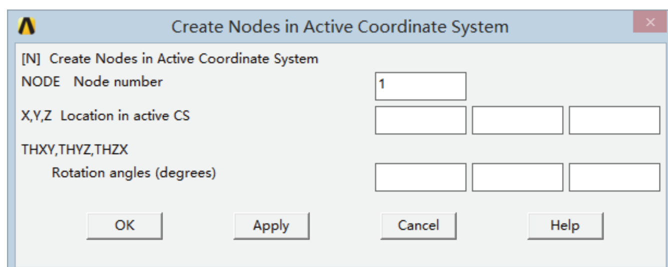


图 10-17 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

在命令窗口输入“*REPEAT,4,1”，如图 10-18 所示，重复上一步的操作，共执行 4 次，生成 4 个在原点位置的节点。

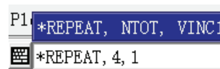


图 10-18 重复操作

（2）建立单元。

1）建立加热器单元（1 号单元）。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes 菜单命令，弹出图 10-19 所示的 Element Attributes 对话框，TYPE 项和 REAL 项分别选择 1 MASS71 和 1，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes 菜单命令，弹出图 10-20 所示的单元建立节点拾取对话框，在文本框中输入“1”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。

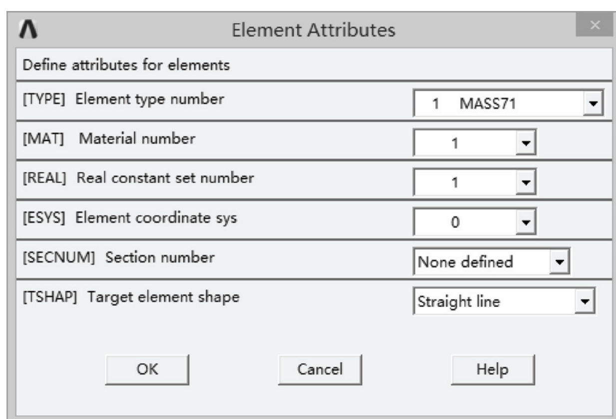


图 10-19 Element Attributes 对话框

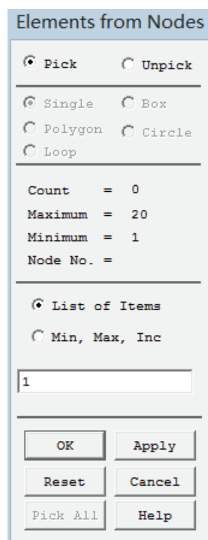


图 10-20 拾取单元建立节点

2）建立加热器和箱体的热交换单元（2 号单元）。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes 菜单命令，弹出 Element Attributes 对话框，TYPE 项和 REAL 项分别选择 2 LINK34 和 3，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes 菜单命令，弹出单

元节点拾取对话框，在文本框中输入“1”，按〈Enter〉键确认，再输入“2”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。

3）建立箱体单元（3 号单元）。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes 菜单命令，弹出 Element Attributes 对话框，TYPE 项和 REAL 项分别选择 1 MASS71 和 2，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes 菜单命令，弹出单元节点拾取对话框，在文本框中输入“2”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。

4）建立温度控制单元（4 号单元）。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes 菜单命令，弹出 Element Attributes 对话框，TYPE 项和 REAL 项分别选择 3 COMBIN37 和 5，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes 菜单命令，弹出单元节点拾取对话框，在文本框中输入“4”，按〈Enter〉键确认，再输入“1,2”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。

5）建立箱体与外界的热交换单元（5 号单元）。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Elem Attributes 菜单命令，弹出 Element Attributes 对话框，TYPE 项和 REAL 项分别选择 3 LINK34 和 4，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Auto Numbered→Thru Nodes 菜单命令，弹出单元节点拾取对话框，在文本框中输入“2”，按〈Enter〉键确认，再输入“3”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。

7．施加初始温度

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Initial Condit’n→Define 菜单命令，弹出 Define Initial Conditions 对话框，如图 10-21 所示，在文本框中输入“1,2”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，弹出初始条件定义对话框，Lab 项选择 TEMP，VALUE 项设为 T0，如图 10-22 所示。单击 OK 按钮。

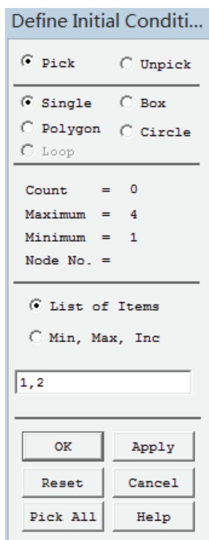


图 10-21　Define Initial Conditions 对话框

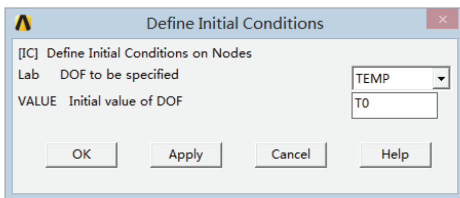


图 10-22　定义初始条件

8．定义温度约束条件

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes 菜单命令，弹出节点温度定义拾取对话框，在文本框中输入“3”，按〈Enter〉键确定，单击 OK 按钮，弹出 Apply TEMP on Nodes 对话框，依次选中 TEMP 和 Constant value，将 VALUE 项设为 T0，单击 Apply 按钮，完成环境温度的定义。

在弹出的对话框中，输入“4”后按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，在弹出的 Apply TEMP on Nodes 对话框中输入“0”，单击 OK 按钮确认。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

9．稳态求解的设置

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient，单击 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，保留默认设置，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Solution Ctrl 菜单命令，弹出图 10-23 所示的 Nonlinear Solution Control 对话框，勾选 SOLCONTROL 项后面的 Off 复选框，单击 OK 按钮。

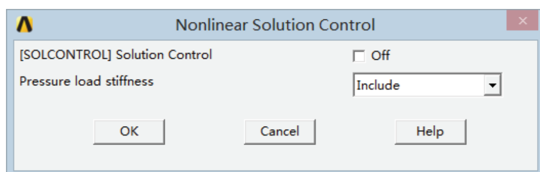


图 10-23　Nonlinear Solution Control 对话框

执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Time/Frequenc→Time-Time Step 菜单命令，弹出 Time and Time Step Options 对话框，设定 TIME 项为 1200，DELTIM 项为 1，KBC 项选择 Stepped，AUTOTS 项选择 ON，在 DELTIM 项的 Minimum time step size 项为 1，DELTIM 项的 Maximum time step size 项为 2，如图 10-24 所示，单击 OK 按钮。

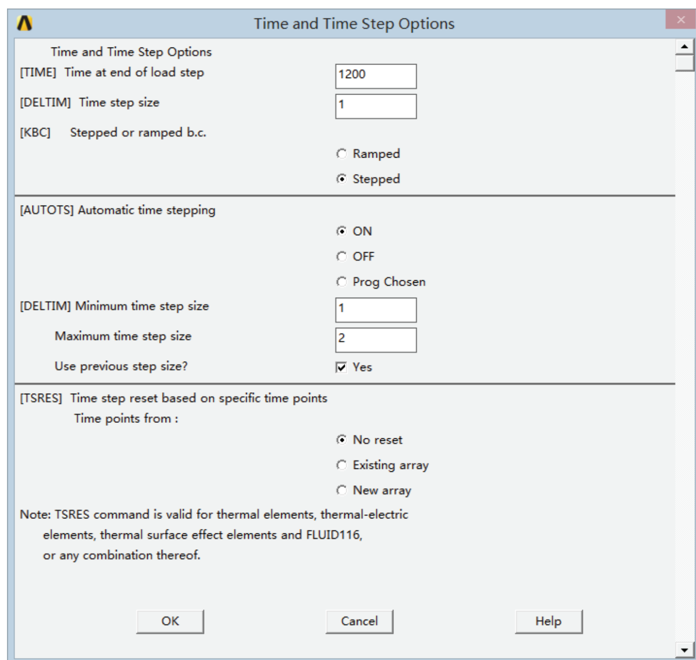


图 10-24　Time and Time Step Options 对话框

10．设置温度偏移量

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Static or Steady

Analysis 对话框，将 TOFFST 项设为 273，其他保留默认设置，单击 OK 按钮。

11．输出控制

执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Output Ctrls→Solu Printout 菜单命令，弹出 Solution Printout Controls 对话框，Item 项选择 All items，FREQ 项选择 Every substep，如图 10-25 所示，单击 OK 按钮。

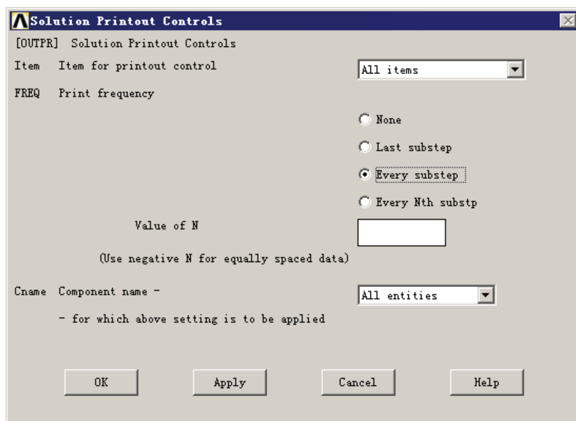


图 10-25 Solution Printout Controls 对话框

12．存盘

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS Toolbar 中的 Save_DB 按钮。

13．求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算并存盘。

14．显示箱体温度随时间的变化曲线图及加热器的工作状态

执行 Main Menu→TimeHistPostpro 菜单命令，弹出 Time History Variables 对话框。或者关闭之后，执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Variable Viewer，打开该对话框，如图 10-26 所示。

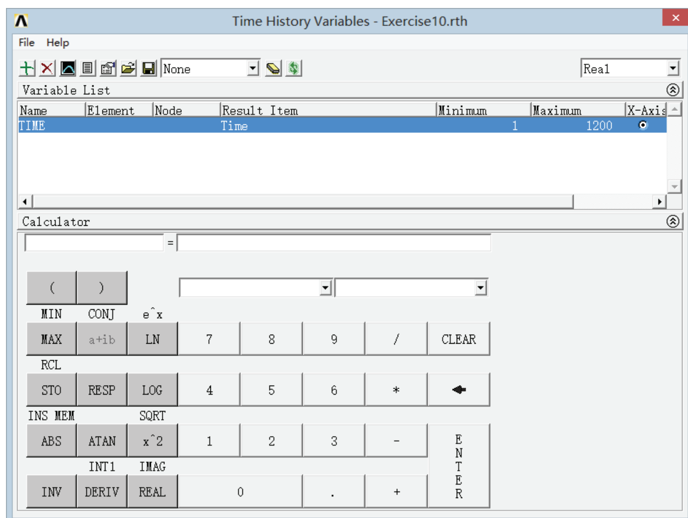


图 10-26 Time History Variables 对话框

单击按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，依次选择 Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature，如图 10-27 所示，单击 OK 按钮，弹出节点拾取对话框，输入“1”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，建立变量 TEMP_2。重复以上操作，在节点拾取对话框中输入“2”，建立变量 TEMP_3。

单击按钮，依次选择 Element Solution→Miscellaneous Items→Non-summable data (NMISC,1)，如图 10-28 所示，弹出图 10-29 所示的 Miscellaneous Sequence Number 对话框，输入“1”，单击 OK 按钮，建立变量 NMISC1_4，在 Add Time-History Variable 对话框中单击 OK 按钮，弹出单元选取对话框，在对话框中输入“4”，如图 10-30 所示，单击 OK 按钮。随后弹出节点选取对话框，在对话框中输入“4”，如图 10-31 所示，单击 OK 按钮。

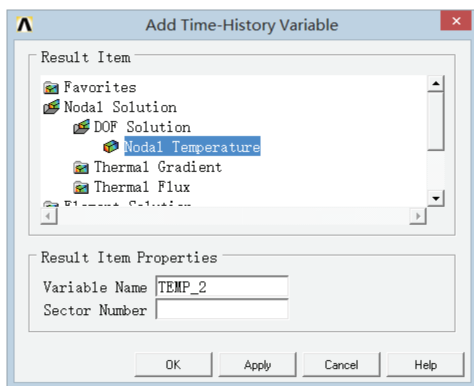


图 10-27　定义温度变量

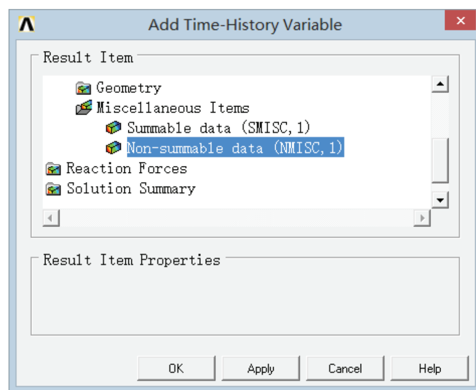


图 10-28　定义状态变量

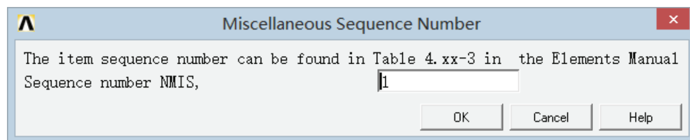


图 10-29　Miscellaneous Sequence Number 对话框

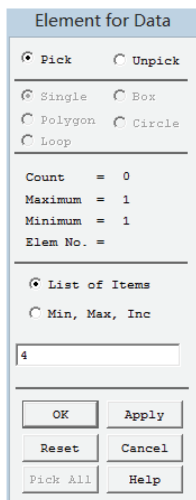


图 10-30　Element for Data 对话框

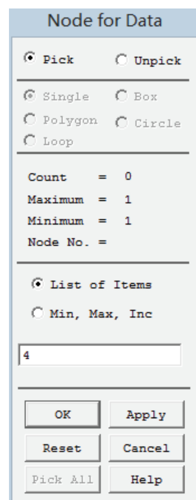


图 10-31　Node for Data 对话框

注：输出变量与单元相关，如本例中的状态变量源于控制单元 COMBIN37，可查看关于 ANSYS HELP VIEWER 中 COMBIN37 单元输出项的详细解释。

完成以上操作后，在 Time History Variable 对话框中，按住〈Ctrl〉键的同时选中 TEMP_2、TEMP_3 和 NMISC1_4，单击▤图标，列表结果如图 10-32 所示。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes 菜单命令，弹出 Axes Modifications for Graph Plots 对话框。/AXLAB 项设为 TIME 和 TEMPERATURE，/XRANGE 项选择 Specified Range，XMIN 和 XMAX 项分别设为 0 和 1200，如图 10-33 所示，单击 OK 按钮。

PRVAR Command

File

TIME	1 TEMP TEMP_2	2 TEMP TEMP_3	4 NMIS 1 NMISC1_4
1.0000	30.1906	21.1151	1.00000
2.0000	48.0727	21.1747	1.00000
4.0000	82.1059	21.4610	1.00000
6.0000	113.954	21.9526	1.00000
8.0000	143.771	22.6273	1.00000
10.000	171.701	23.4648	1.00000
12.000	197.876	24.4467	1.00000
14.000	222.419	25.5561	1.00000
16.000	245.444	26.7774	1.00000
18.000	267.055	28.0967	1.00000
20.000	287.352	29.5008	1.00000
22.000	306.423	30.9782	1.00000
24.000	324.354	32.5181	1.00000
26.000	341.223	34.1107	1.00000
28.000	357.100	35.7472	1.00000
30.000	372.054	37.4196	1.00000
32.000	386.145	39.1204	1.00000

图 10-32 时间变量结果列表

Axes Modifications for Graph Plots

[/AXLAB] X-axis label TIME
[/AXLAB] Y-axis label TEMPERATURE
[/GTHK] Thickness of axes: Double
[/GRTYP] Number of Y-axes: Single Y-axis
[/XRANGE] X-axis range: ○ Auto calculated ◉ Specified range
XMIN,XMAX Specified X range: 0 1200
[/YRANGE] Y-axis range: ◉ Auto calculated ○ Specified range
YMIN,YMAX Specified Y range -
NUM - for Y-axis number: 1
[/GROPT],ASCAL Y ranges for -: Individual calcs
[/GROPT] Axis Controls
LOGX X-axis scale: Linear
LOGY Y-axis scale: Linear
AXDV Axis divisions: ☑ On
AXNM Axis scale numbering: On - back plane
AXNSC Axis number size fact: 1
DIG1 Signif digits before -: 4

OK Apply Cancel Help

图 10-33 Axes Modification for Graph Plots 对话框

在 Time History Variable 对话框中选中 TEMP_3，单击▨图标，绘制箱体温度随时间的变化曲线如图 10-34 所示。

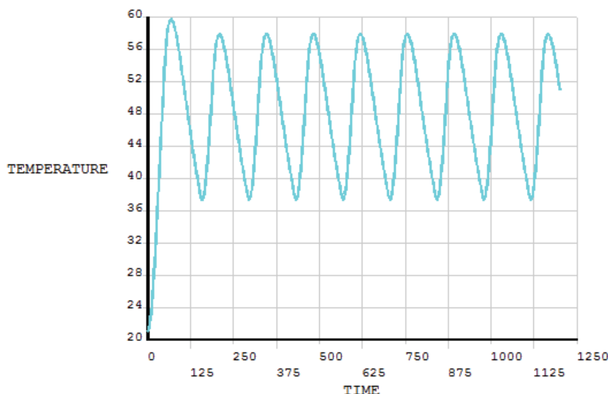


图 10-34 箱体温度随时间的变化曲线图

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes 菜单命令，弹出 Axes Modification for Graph Plots 对话框。/AXLAB 项设为 TIME 和 STAT，/XRANGE 项选择 Specified Range，XMIN 和 XMAX 项分别设为 0 和 1200，单击 OK 按钮。

在 Time History Variable 对话框中选中 NMISC1_4，单击图标，加热器工作状态随时间的变化曲线如图 10-35 所示。

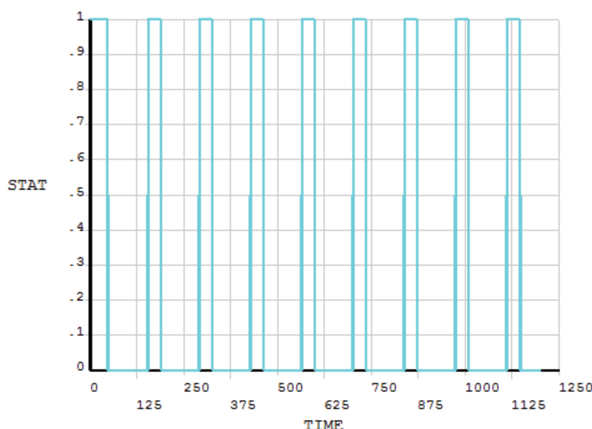


图 10-35　加热器工作状态随时间的变化曲线图

15．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

10.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise10
/PREP7                          !进入前处理器
C1=0.1585
C2=1.5852
ALPH=7
A1=0.76E-3
A2=3.87E-3
Ton=37.8
Toff=51.7
T0=21.1
Q=2.93                          !定义参数值
ET,1,MASS71                     !定义热质量单元
ET,2,LINK34                     !定义对流换热单元
ET,3,COMBIN37                   !定义控制单元
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,4,0                    !设定热质量单元的求解选项
KEYOPT,3,3,8
```

```
KEYOPT,3,5,1
KEYOPT,3,6,0                   !定义控制单元的求解选项
R,1,C1, , , , , ,              !定义加热器的比热容
R,2,C2,0,0,0,0,0,              !定义加热器箱体的比热容
R,3,A1, , ,                    !定义加热器表面积
R,4,A2,0,0,                    !定义加热器箱体表面积
R,5, , , ,Ton,Toff,-Q,         !定义加热器温度控制参数
RMORE, ,1, , , , ,             !定义加热器初始时为开工作状态
MP,HF,1,ALPH                   !定义材料参数
N,1,,,,,,
*REPEAT,4,1                    !建立节点
TYPE,   1
REAL,   1
E,      1                      !建立加热器单元
TYPE,   2
REAL,       3
E,      1,2                    !建立加热器和箱体间的热交换单元
TYPE,   1
REAL,       2
E,      2                      !建立箱体的单元
TYPE, 3
REAL,   5
E,      4,1,2                  !建立温度控制器单元
TYPE,   2
REAL,       4
E,      2,3                    !建立箱体的热交换单元
FINISH
/SOLU                          !进入求解器
IC,1,TEMP,T0,
IC,2,TEMP,T0,                  !定义初始温度值
D,3,TEMP,T0
D,4,TEMP,0                     !定义温度约束条件
ANTYPE,TRANS                   !定义为瞬态求解分析
SOLCONTROL,0                   !定义收敛控制选项
KBC,1                          !设置载荷加载类型
AUTOTS,ON                      !打开自动时间开关
TIME,1200                      !定义求解时间
DELTIM,1,1,2,0                 !设定时间步长，最大及最小时间步长
TOFFST,273                     !设置温度偏移量
OUTRES,ALL,ALL,                !定义输出控制
SOLVE                          !求解
FINISH
/POST26                        !进入时间历程后处理器
NSOL,2,1,TEMP,, TEMP_2
STORE,MERGE
NSOL,3,2,TEMP,, TEMP_3
```

```
STORE,MERGE
ESOL,4,4,4 ,NMISC,1,NMISC1_4
STORE,MERGE                      !定义时间历程变量
PRVAR,2,3,4                      !列出时间历程变量
/AXLAB,X,TIME                    !更改 X 坐标轴标识为 TIME
/AXLAB,Y, TEMPERATURE            !更改 Y 坐标轴标识为 TEMPERATURE
PLVAR,3                          !绘制控制器温度随时间的变化曲线
/AXLAB,X, TIME                   !更改 Y 坐标轴标识为 STAT
/AXLAB,Y, STAT                   !更改 X 坐标轴标识为 TIME
PLVAR,4                          !绘制加热器的工作状态随时间的变化曲线
/EXIT,NOSAV                      !退出 ANSYS
```

10.4 本章小结

本章简单介绍了瞬态热分析的基本特性和采用 ANSYS 进行瞬态热分析的计算原理，对瞬态热分析的边界条件施加方法、求解选项设置，以及使用 ANSYS 进行瞬态热分析的基本思路和操作步骤进行详细讲述，为瞬态热分析的实际操作提供指导。通过 3 个简单实例的实践操作，读者可以掌握 ANSYS 瞬态热分析的求解过程和应用。

第 11 章 热辐射分析

热辐射是热传导和热对流之外的 3 种热传递方式之一，本章详细介绍热辐射的基本理论，针对 ANSYS 进行热辐射分析的 4 种辐射建模仿真方法及其基本步骤进行详细的讲解。并通过一个典型的工程应用案例，详述使用 ANSYS 进行热辐射分析的基本步骤和使用技巧。

学习目标：

（1）理解热辐射分析的基本理论；

（2）了解 ANSYS 中 4 种辐射建模仿真方法；

（3）掌握分析边界条件简化的基本思路及 ANSYS 的表面效应单元使用方法。

（4）掌握 ANSYS 进行热辐射分析的基本方法及基本操作步骤、命令。

11.1 热辐射分析概述

由于热的原因而产生的电磁波辐射称为热辐射，只要物体的温度高于“绝对零度”，物体就总是不断地把热能变为辐射能向外发出热辐射，同时，物体亦不断地吸收周围物体投射到它表面上的热辐射，并把吸收的辐射能重新转变成热能。辐射传热是物体之间相互辐射和吸收的总效果。

11.1.1 热辐射特性

辐射传热具有以下特性。

（1）辐射热传递是通过电磁波传递热能的方法，其传递能量值与电磁波波长有关，热辐射的电磁波波长为 0.1~100 μm，包括超微波，所有可以用肉眼看到的波长和长波。

（2）不像其他热传递方式需要介质，热辐射不需要介质，它在真空中传递效率最高。

（3）对于半透明体，如玻璃，辐射是三维实体现象，因为辐射从体中发散出。

（4）对于不透明体，辐射主要是平面现象，因为几乎所有内部辐射都被实体吸收了。

（5）两平面间的辐射热传递与平面绝对温度差的四次方成正比，因此，辐射分析是非线性的，需要迭代求解。

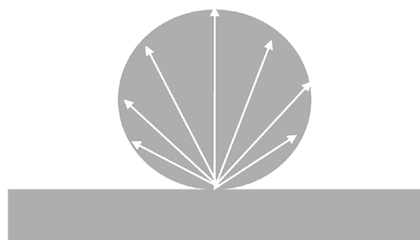
11.1.2 热辐射基本术语

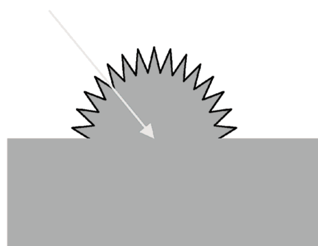
1．平面辐射和吸收

热辐射时，热量辐射到其他平面并从其他平面吸收热。当进行辐射分析时，考虑的是辐射和吸收之间的净效率。平面对不同波长都会有辐射和吸收，平面辐射强度与波长和辐射方向都有关系。平面辐射强度与方向的关系如图 11-1 所示。

2．散射或反射

平面可以简化为散射或反射关系。散射装置将辐射均匀反射到所有方向，散射示意图如图 11-2 所示。而反射平面则不管辐射源的方位，将辐射以近乎镜像的方式反射，如图 11-3 所示。


图 11-1　辐射示意图


图 11-2　散射示意图

没有任何实际的平面是真正的散射平面或反射平面。比较灰暗的平面接近散射平面，高度抛光的平面接近反射平面。为了简化计算，平面的辐射特性可以将所有的波长和方向进行平均，因此只对这些平均特性进行讨论。

3．吸收和反射

对于承受一定辐射的不透明介质，一部分辐射能会从平面反射，一部分会被介质吸收，平面总吸收率和总反射率存在如下关系：

$$\alpha + \rho = 1 \tag{11-1}$$

式中，α 为平面总吸收率，与之吸收偶然辐射的趋势有关；ρ 为平面总反射率，与之反射辐射的趋势有关。

4．发射率和发射能

同样，平面总发射率（ε）是平面所在方向使用所有波长发射热的能力，它是一个无量纲数值。平面在所有方向上所有波长发射的总能量由史蒂芬-波斯曼定律确定。

5．辐射率

总辐射率表示平面发射和反射的能量总和（如离开平面的总能量），其单位为热流单位（J），其分布图如图 11-4 所示。由于 ANSYS 不直接计算平面反射率，假设辐射率和发射率相等（$E=J$）。

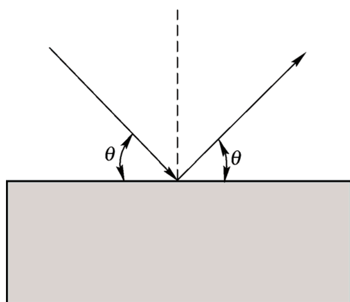


图 11-3　反射示意图

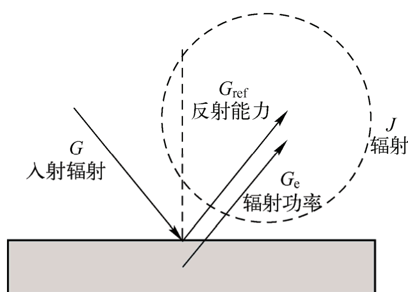


图 11-4　辐射能分布示意图

6．黑体和灰体

（1）黑体是一种理想化的物体，用来与实际物体进行比较，其特性如下。

1）黑体吸收所有的偶然辐射，没有反射，不管波长和方向。

2）黑体为纯粹的发射器。对于给定的波长和稳定，没有平面比黑体发射更多的能量。

3）黑体为纯粹的散射发射器，辐射在所有方向均一致。因此，对于黑体，发射率为 1。

（2）实际物体都是灰体，它们不像黑体，灰体在温度 T 的总发射率如下：

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_b(T)} \tag{11-2}$$

式中，E 为灰体表面的发射强度；E_b 为黑体表面的发射强度；ε 为灰体在温度 T 的总发射率。因此，对于灰体，$\varepsilon < 1$。

7．角系数

角系数由相互辐射的两个平面（i 和 j）确定。它的计算式如下：

$$F_{ij} = \frac{F_j}{F_i} \tag{11-3}$$

式中，F_{ij} 为角系数；F_j 为平面 j 从平面 i 吸收的辐射能；F_i 为平面 i 放出的辐射能。

两个平面的角系数是面积、方向和距离的函数。计算公式如下：

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i}\int_{A_i}\int_{A_j}\frac{\cos(\theta_i)\cos(\theta_j)}{\pi r^2}\mathrm{d}A_j\mathrm{d}A_i \tag{11-4}$$

式中，A_i 为面积 i 的面积；A_j 为面积 j 的面积；r 为平面 i 和平面 j 间的距离；N_i 为 dA_i 的法向量；N_j 为 dA_j 的法向量；θ_i 为法向量 N_i 和 r 间的夹角；θ_j 为法向量 N_j 和 r 间的夹角。两面间的示意图如图 11-5 所示。

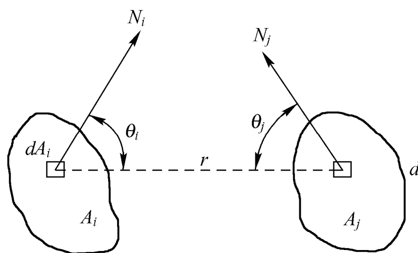


图 11-5 角系数计算示意图

在研究实际问题时，通常要考虑多个辐射平面的相互作用。要考虑的平面越多，问题越复杂。对于有 n 个平面的系统，形状因子矩阵由 n^2 个元素组成，见下式：

$$\underset{n\times n}{[F]} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F_{n1} & F_{n2} & & F_{nn} \end{bmatrix} \tag{11-5}$$

从任何平面发射的能量必须守恒，因此有下式成立：

$$F_{i1} + F_{i2} + \cdots + F_{in} = 1 \tag{11-6}$$

而且相互作用需要满足如下等式：

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \tag{11-7}$$

8．两平面间的辐射传递

要计算从平面 i 到平面 j 的热传递，使用相互作用法则和史蒂芬–波斯曼法则得到：

$$Q_{i-j} = A_i F_{ij} \varepsilon\sigma(T_i^4 - T_j^4) \tag{11-8}$$

也可以写为如下形式：

$$Q_{i-j} = K'(T_i - T_j) \tag{11-9}$$

$$K' = A_i F_{ij} \varepsilon\sigma(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j) \tag{11-10}$$

11.2 ANSYS 中进行辐射分析

辐射是通过电磁波形式传递的能量，电磁波以光速传播，所以辐射能的传递不需要介质。由于电磁波造成的能量传递是主题温度的 4 次方，所以辐射分析是高度非线性的。

11.2.1 ANSYS 中热辐射的处理方法

1．ANSYS 中关于辐射的重要假设

（1）ANSYS 认为辐射是平面现象，因此适合用于不透明平面建模。

（2）ANSYS 不直接计入平面反射率。考虑到效率，假设平面吸收率和发射率相等。因此，只有发射率特性需要在 ANSYS 辐射分析中定义。

（3）ANSYS 不自动计入发射率的方向特性，也不允许发射率定义随波长变化。发射率可以在某些单元中定义为温度的函数。

（4）ANSYS 中所有分隔辐射面的介质在计算辐射能量交换时都被看作不参与辐射的能量交换（不吸收也不发射能量）。

2．ANSYS 求解方法

ANSYS 使用一个简单的过程求解多个平面辐射问题，矩阵形式如下：

$$[K']\{T\} = \{Q\} \tag{11-11}$$

式中，$[K']$ 是 T^3 的函数。

生成多平面问题系统的矩阵要比前面列出的简单因子近似方法复杂。辐射是高度非线性分析，需要使用牛顿–拉夫森迭代求解。

11.2.2 ANSYS 中进行辐射分析的几个概念

ANSYS 中提供了以下 4 种方法分析热辐射问题。

（1）用 LINK31、辐射线单元分析两个点或多对点之间的热辐射。

（2）用表面效应单元 SURF151 或 SURF152 分析点对面或面与外界环境间的热辐射。

（3）用 AUX12、辐射矩阵生成器分析两个面或多个面之间热辐射问题。

（4）用光能传递求解方法分析两个面或多个面之间的热辐射问题。该方法适用于具备温度自由度的 2D 或 3D 单元。

以上 4 种热辐射分析方法既可用于稳态热分析，也可用于瞬态热分析。

在进行辐射分析时，需要用到一些概念，在这里作简单的介绍。

（1）辐射腔。在热辐射问题中，开放或封闭的辐射腔是由一系列相互辐射的辐射面组成。在 ANSYS 分析中，可以定义多个辐射腔，通过辐射腔的定义来计算辐射腔内面之间的角度系数。对于开放的辐射腔，可以定义单独的环境温度或者局部环境温度定义的空间节点。

（2）辐射面。一个封闭腔内，无论是开放的还是封闭的，可以包含很多相互辐射的面。每个辐射面都有它自己的发射率和辐射方向。发射率可以是温度的函数。

（3）角度系数。在 ANSYS 中，可以通过隐藏或非隐藏方法来计算 2D 和 3D 问题，可以采用 Hemicube 来计算 3D 问题的辐射角度系数。

（4）辐射系数。辐射系数等于系统系数，辐射系数与反射系数之和等于 1。

（5）斯忒藩–波斯曼常数。默认为英制单位 0.199E-10Btu/(hr•in^2•K^4)，当采用国际单位制进行分析时，输入 5.67。

（6）温度偏移量。进行热辐射计算时使用的温度为绝对温度，因此在加载温度载荷时，若使用的是华氏温度，需要设置 460 的差值；如果是摄氏温度，则要设置 273 的差值。设置方式为执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出图 11–6 所示的 Full Transient Analysis 对话框，将 TOFFST 项设为输入温度偏移量即可。

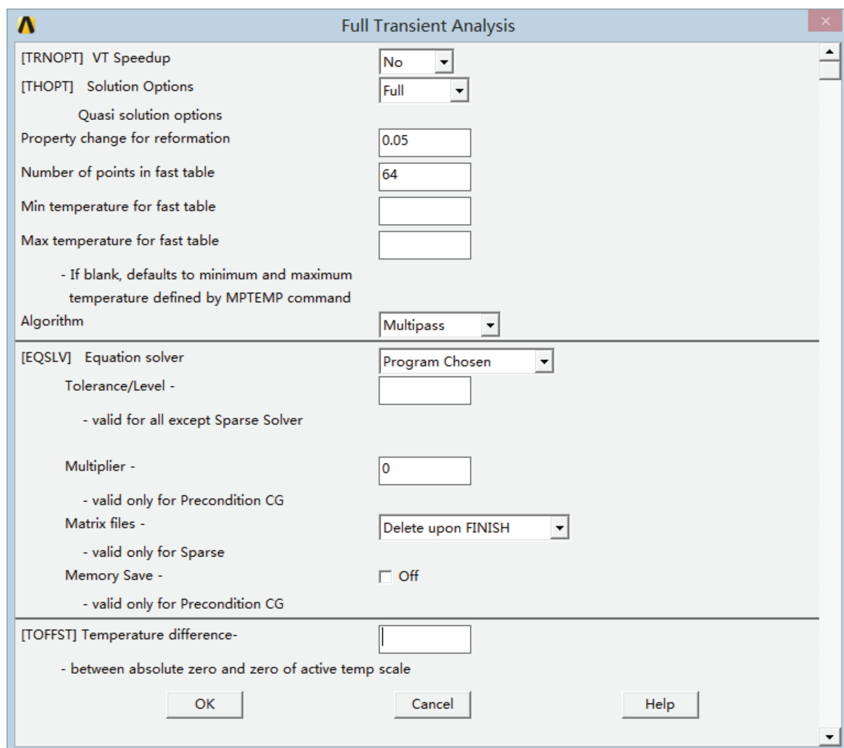


图 11–6　Full Transient Analysis 对话框

（7）环境温度。对于开放的辐射腔，需要定义环境温度以完成计算，不同的辐射腔可以

定义不同的环境温度值。

（8）空间节点。对于开放的辐射腔，如果辐射环境是其他模型，可以通过定义空间节点的温度来实现环境温度的定义。

（9）光能传递求解器。光能传递求解器通过求解每个面流出的能量值来计算不同辐射体之间的能量交换，这种方案的前提是所有面的温度值已知。表面的热量传递为有限元模型的热分析提供边界条件。在一个新的时间步或者新的迭代过程中，当一个新的表面温度确定时，该表面的热量传递均要重新计算得出。对于每一个面，在计算中使用的表面温度必须统一。

11.2.3 使用辐射线单元建立辐射模型

LINK31 是一个两节点非线性单元，用于计算由辐射引起的两点之间的热传递，也可以用于多点间的辐射。两点间的热传递计算式：

$$q_{1-2} = \varepsilon\sigma(A_1F_{12}T_1^4 - A_2F_{21}T_2^4) \qquad (11\text{-}12)$$

式中，q_{1-2} 为节点 1 到节点 2 间的热流率；A_1 为节点 1 的面积；A_2 为节点 2 的面积；F_{12} 为节点 1 到节点 2 的角系数；F_{21} 为节点 2 到节点 1 的角系数。

远离节点的位置可选或属于其他单元。随温度变化的发射率可以在辐射连续单元 LINK31 中指定。

LINK31 需要定义的实常数如下。

（1）有效的热辐射面积（AREA(A_i)）。

（2）角系数（FORMF(F_{ij})）

（3）发射率（EMIS(ε)）。

（4）Stefan-Boltzmann 常数（史蒂芬-波尔斯曼常数（σ））。

11.2.4 使用表面效应单元建立辐射模型

利用表面效应单元可以方便地分析点与面或面与空气之间的辐射传热。角系数必须已知，但通常未知。SURF151 用于二维模型，SURF152 用于三维模型。单元应设置为包含辐射 KEYOPT(9)。

1．SURF151 二维表面效应单元

将 SURF151 单元覆盖在模型中有辐射的面上，远离 SURF151 单元指定附加节点。空间节点需要属于其他辐射面单元或是单独的，带有施加的温度约束。

（1）需要定义的材料属性。发射率（EMIS(ε)）。可以定义随温度变化的发射率。

（2）需要定义的实常数。

1）角系数（FORMF(F_{ij})），如果设置 ANSYS 的计算选项，则不需要定义此实常数。

2）Stefan-Boltzmann 常数（史蒂芬-波尔斯曼常数（σ））。

（3）单元选项设置。

1）设置辐射的附加节点（K5），此处设置包括或不包括。执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，选中已定义的 SURF151，单击 Options 按钮，在弹出的对话框中，在 Extra node for radiation-K5 下拉列表框中选择

Exclude、Include 1 node 或 Include 2 nodes，如图 11-7 所示。

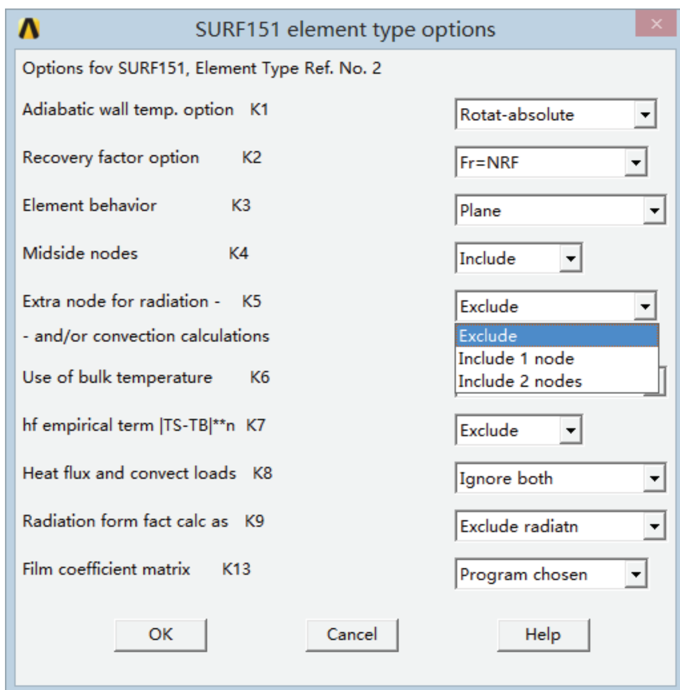


图 11-7 SURF151 element type options 对话框

2）设置角度系数（K9），此处设置是否计算角度系数。对于图 11-7 所示的对话框，在 Radiation form fact calc as K9 下拉列表框中选择 Exclude radiation、Real const FORMF、Absolute value 或者 Zero if negative。

2．SURF152 三维表面效应单元

将 SURF152 单元覆盖在模型中有辐射的面上，远离 SURF152 单元指定附加节点。附加节点需要属于其他辐射面的单元或是单独的，带有施加的温度约束。

（1）需要定义的材料属性。发射率（EMIS(ε)）。可以定义随温度变化的发射率。

（2）需要定义的实常数。

1）角系数（FORMF(F_{ij})），如果设置 ANSYS 的计算选项，此处不需要定义此实常数；

2）Stefan-Boltzmann 常数（史蒂芬-波尔斯曼常数（σ））。

（3）单元选项设置。

1）设置辐射的附加节点（K5），此处设置包括或不包括。执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，选中已定义的 SURF152，单击 Options 按钮，弹出 SURF152 element type options 对话框，在 Extra node for radiation K5 下拉列表框中选择 Exclude、Include 1 node 或 Include 2 nodes，如图 11-8 所示。

2）设置角度系数（K9），此处设置是否计算角度系数。在图 11-8 所示的对话框，在 Radiation form factor calc as K9 下拉列表框中选择 Exclude radiation、Real const FORMF、Absolute value 或 Zero if negative。

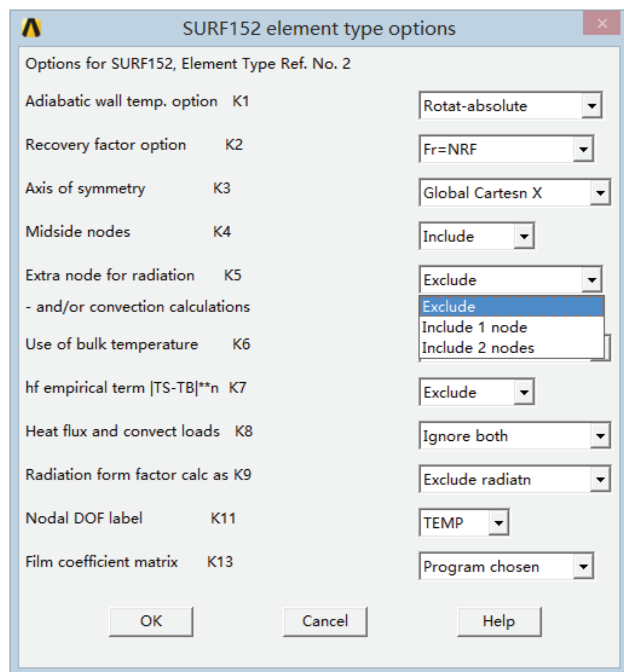


图 11-8 SURF152 element type options 对话框

11.2.5 使用辐射矩阵单元建立辐射模型

此方法用于计算多个辐射面之间的辐射传热。这种方法生成辐射面之间的角度系数矩阵，并将此矩阵作为超单元用于热分析。该方法适用于如下情况。

（1）使用在形状因子未知的情况下。

（2）在不同定位的平面上生成形状因子，F_{ij}。

（3）用于平面间的相互辐射。

（4）可以用于封闭或开放系统。

（5）不能使用随温度变化的发射率。

（6）需要非常大的计算工作量，可能需要相对大量的 CPU 时间和存储空间，特别是使用 HIDDEN 方法时。

补充辐射能量交换方程：

$$\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i}-F_{ji}\left(\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i}\right)\right)\frac{1}{A_i}Q_i=\sum_{i=1}^{N}(\delta_{ji}-F_{ji})\sigma T_i^4 \tag{11-13}$$

式中，N 为辐射面数量；δ_{ji} 为科氏符号，$\begin{cases}\delta_{ji}=1, & \text{当} j=i \\ \delta_{ji}=1, & \text{当} j\neq i\end{cases}$；$T_i$ 为表面 i 的绝对温度；Q_i 为表面 i 的绝热流率。

矩阵$\left[K^{ts}\right]$代表两个或多个平面间的辐射效果，它包括计算多个平面的形状因子，由下式计算：

$$\left[K^{ts}\right]\left\{T^{4}\right\}=\{Q\} \tag{11-14}$$

在求解过程中，方程线性化，然后用线性方程求解器迭代求解下式：

$$\left[K^{'}\right]\{T\}=\{Q\} \tag{11-15}$$

式中，$[K']$ 是 $\{T\}$ 的函数，而 $\left[K^{ts}\right]$ 不是。因此，辐射矩阵不需要在每次的迭代中计算。但是，随温度变化的发射率不能包括在内。

在使用辐射矩阵单元建立辐射模型有如下 3 个主要步骤。

步骤 1：定义辐射面。

（1）建立在热分析中使用的模型，不支持对称分析。

（2）在所有辐射平面上，覆盖网格。

1）在 2D 辐射面上建立 LINK33 单元。

2）在 3D 辐射面上建立 SHELL131 单元。

在 LINK33 和 SHELL131 的建立中，需要注意以下几点。

- 所建立的 LINK33 或 SHELL131 网格要与下面的实体单元在模型和阶次上相适应，其单元和节点必须与实体单元相吻合，否则计算结果是不正确的。
- 如果辐射面上有不同的发射率，保证在相应的平面上指定不同的材料特性。
- 覆盖单元必须有正确的方向。

对于 LINK33 单元，单元的 Y 轴正方向必须指向观察面（辐射方向）。

对于 SHELL131 单元，单元的 Z 轴正方向必须指向观察面（辐射方向）。

因此，在 LINK33 或 SHELL131 单元时要注意节点的排列顺序。

（3）定义空间节点，用于吸收所有未被其他平面吸收的辐射能量。空间节点具有如下特性。

1）空间节点的位置可以选择。

2）在开放系统中，需要定义空间节点。

3）对于封闭系统，不推荐使用空间节点。

4）空间节点可以属于一个单元或是单独的，并带有温度约束。

步骤 2：生成辐射矩阵。

（1）执行 Main Menu→Radiation Opt→Matrix Method 菜单命令进入辐射矩阵单元。

（2）选择组成辐射面的所有节点和单元，如果定义了空间节点，则包括空间节点在内。

（3）确定模型是 3D 还是 2D。执行 Main Menu→Radiation Opt→Matrix Method→Other Setting 菜单命令，弹出图 11-9 所示的 Radiation Matrix Settings 对话框。AUX12 用不同的算法计算 2D 或 3D 模型的形状系数。AUX12 默认为 3D，2D 分为纯平面或轴对称，默认为纯平面。

（4）定义每个辐射面的发射率（默认为 1）。执行 Main Menu→Radiation Opt→Matrix Method→Emissivities 菜单命令，弹出图 11-10 所示的 Define Emissivities 对话框，EVALU 项为发射率值。

（5）定义斯忒藩-玻尔兹曼常数。执行 Main Menu→Radiation Opt→Matrix Method→Other Setting 菜单命令，在图 11-9 所示的对话框中将 STEF 项设为斯忒藩-玻尔兹曼常数值。

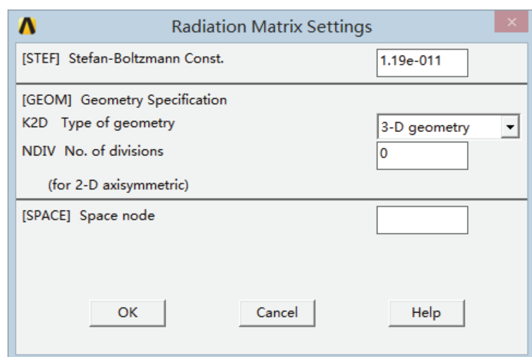


图 11-9 Radiation Matrix Settings 对话框

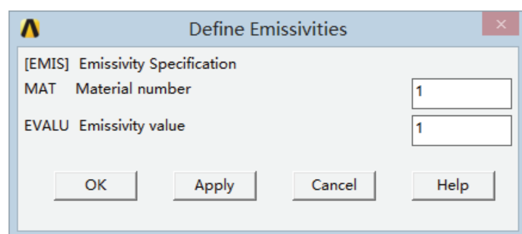


图 11-10 Define Emissivities 对话框

（6）确定用于计算角度系数的方式。执行 Main Menu→Radiation Opt→Matrix Method→Write Matrix 菜单命令，弹出图 11-11 所示的 Write Radiation Matrix To File 对话框，NOHID 项选择是采用隐藏还是非隐藏方法进行角度系数的计算。

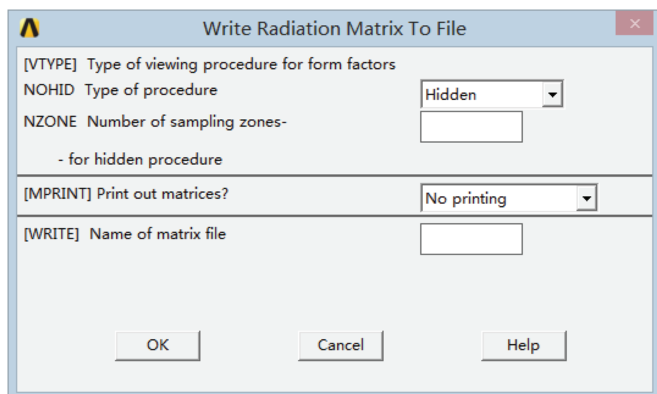


图 11-11 Write Radiation Matrix to File 对话框

1）非隐藏方法（Non-Hidden）：计算每两个单元之间的形状系数，无论它们之间有无障碍。

2）隐藏方法（Hidden）（默认）：用一种隐藏线算法判定两个辐射面之间是否“可见”，如果可见，则计算角度系数。设置射线数目，增加射线数目将增加角度系数的计算精度（默认为 20）。

（7）打开打印键（如果需要的话）检查角系数参数输出。

执行 Main Menu→Radiation Opt→Matrix Method→Write Matrix 菜单命令，弹出图 11-11 所示的 Write Radiation Matrix To File 对话框，MPRINT 项用于确定是否打印输出。

（8）如果为开放系统，须定义空间节点。执行 Main Menu→Radiation Opt→Matrix Method→Other Setting 菜单命令，在图 11-9 所示的 Radiation Matrix Settings 对话框中将 SPACE 项设为节点编号。

（9）重新选择模型中其他所有的单元和节点。执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令。

（10）计算辐射矩阵并写入 jobename.sub 文件，在热分析过程中用作 MATRIX50 超单元。执行 Main Menu→Radiation Opt→Matrix Method→Write Matrix 菜单命令，在图 11-11 所示的 Write Radiation Matrix To File 对话框中将 WRITE 项设为矩阵的文件名。

步骤 3：使用辐射矩阵。

（1）执行 Main Menu→Preprocessor 菜单命令，重新进入前处理器。

（2）定义新的单元类型 MATRIX50，并改变其关键选项 K1 为辐射子结构。

1）定义 MATRIX50 单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Superelement 和 Superelement 50，如图 11-12 所示。

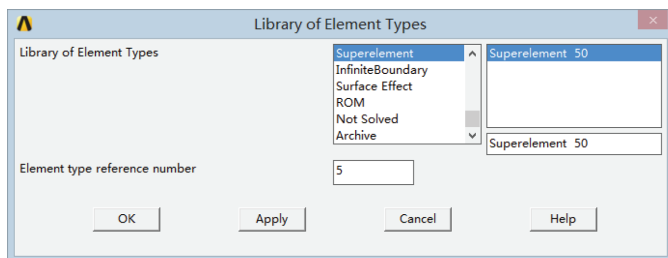


图 11-12 Library of Element Types 对话框

2）改变 MATRIX50 关键选项 K1 为辐射子结构。

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，选中 Superelement 和 Superelement 50，单击 Option 按钮，弹出图 11-13 所示的 MATRIX50 element type options 对话框，K1 项选择 Radiation substr。

（3）将单元类型指向超单元。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→ElemAttibutes 菜单命令，弹出图 11-14 所示的 Element Attributes 对话框，TYPE 项选择 1 MATRIX50，单击 OK 按钮。

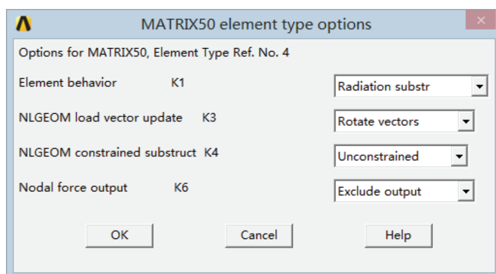


图 11-13 MATRIX50 element type options 对话框

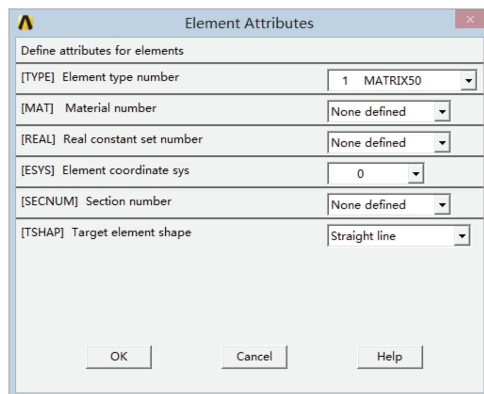


图 11-14 Element Attributes 对话框

（4）读入超单元矩阵。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Elements→Superelements→

From.SUB File 菜单命令，弹出图 11-15 所示的 Read in Superelement From Matrix File（.SUB）对话框，将 File 项设为单元矩阵文件的名字，单击 OK 按钮。

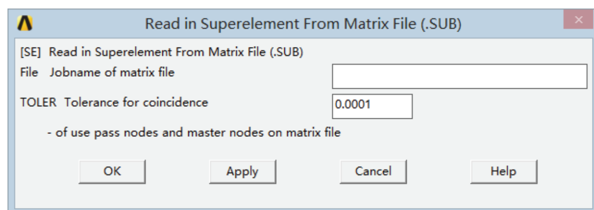


图 11-15 Read in Superelement From Matrix File（.SUB）对话框

（5）不选择或删除用于生成辐射矩阵的 LINK32 或 SHELL57 单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling Delete→Elements 菜单命令，选中 LINK32 或 SHELL57 单元并进行删除操作。

（6）定义温度偏移量。

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，在弹出的对话框中将 TOFFST 项设为温度偏移值即可。

（7）进入求解器并在空间节点上定义热边界条件，开始计算。

11.2.6 使用光能传递求解方法建立辐射模型

此方法应用于计算两个或多个面之间的辐射传热，对于所有具备温度自由度的 2D 单元和 3D 单元均适用。

为进行光能传递的求解，将式 11-13 转变为如下形式：

$$\sum_{j=1}^{N}(\delta_{ij}-F_{ij}(1-\varepsilon_i))q_j^0=\varepsilon_i\sigma T_i^4 \qquad (11\text{-}16)$$

和

$$q_i=q_i^0-\sum_{j=1}^{N}F_{ij}q_j^0 \qquad (11\text{-}17)$$

以上两式是从流出每个面的辐射热流量 q_j^0 和净流出热量 q_i 两方面来考虑的。对于已知表面温度 T_i 的辐射腔体，可以构建一系列的线性方程组来计算每个面的辐射热流量。式 11-17 可以写成如下形式：

$$[A][q^0]=[D] \qquad (11\text{-}18)$$

其中，

$$A_{ij}=\delta_{ij}-(1-\varepsilon_i)F_{ij}$$

q_j^0 = 面 i 的表面辐射热流率

$$D_i=\varepsilon_i\sigma T_i^4$$

[A]为由角度系数代表的面与面之间的耦合关系，并且由于面的发射率可以是温度的函数，该项可以表述为温度的函数值。式 11-18 可以通过牛顿-拉夫森算法来求解辐射热流率 $\{q^0\}$。

当式 11-17 中的 q^0 计算得出后，可以计算每个面的净热流量。面的净热流量值为模型

的有限元计算提供热边界条件。式 11-17 的辐射热流量计算与热传导计算通过采用各自的算法分别计算，直到在每一个迭代步和载荷步中辐射热流量计算与热传导计算均达到收敛。

在以上的迭代计算过程中，每个面的温度值必须一定，以满足进行辐射热流量求解和热传导求解的要求。在有限元模型中，所说的面相对应于单元的面或者边，通过将单元面或边周边的节点取平均来获得面的温度值。

对于一个开放辐射腔，在使用光能传递方法来求解辐射问题时，需要通过定义空间温度或者通过定义空间节点的方式来定义环境温度，以实现表面与外界之间的能量平衡问题。

采用光能传递方法求解辐射问题，需要以下几个步骤。

步骤 1：定义辐射面。

（1）建立在热分析中使用的有限元模型。在高级光能传递方法中支持对称分析。

（2）通过发射率和辐射腔编号来标记辐射面。对于相互之间有辐射传热的辐射面，标记为相同的辐射腔编号。这里可以通过定义材料属性的方式定义随温度变化的发射率。

执行 Main Menu→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Radiation 菜单命令，针对所要解决的问题选中 On Lines、On Areas、On Nodes 或者 On Elements，当选中 On Lines 时，弹出图 11-16 所示的对话框，将 VALUE 项设为发射率值，VALUE2 项设为该线所属辐射腔的编号。

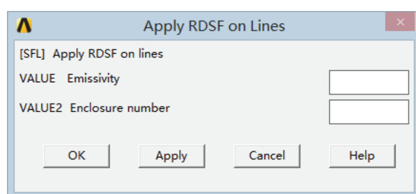


图 11-16 Apply RDSF on Lines 对话框

（3）核实标记的辐射面的编号和发射率等，并加载其他边界条件和载荷。

步骤 2：定义求解选项。

（1）定义斯忒藩-波尔斯曼常数。执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→Solution Opt 菜单命令，打开图 11-17 所示的 Radiation Solution Options 对话框，将 STEF 项设为斯忒藩-波尔斯曼常数值。

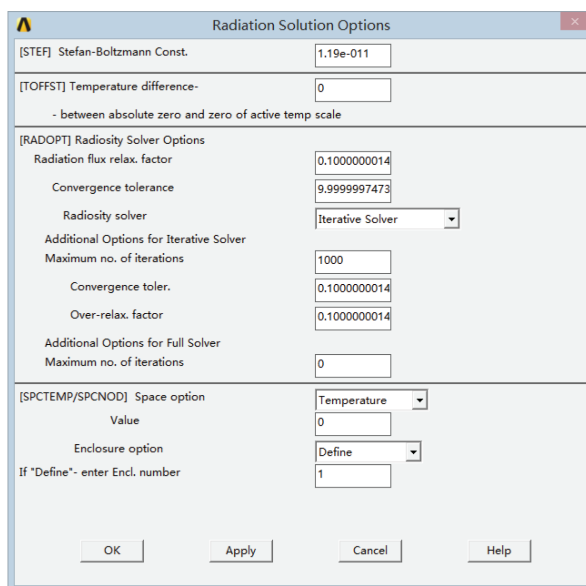


图 11-17 Radiation Solution Options 对话框

（2）定义温度偏移值。执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→Solution Opt 菜单命令，在图 11-17 所示的 Radiation Solution Options 对话框中，将 TOFFST 项设为温度偏移值，对于华氏温度和摄氏温度，分别输入 460 和 273。

（3）选中辐射求解算法。在图 11-17 所示的 Radiation Solution Options 对话框中，在 RADOPT 项的 Radiostiy solver 下拉列表框中选择求解算法，包括直接求解和迭代求解两类，默认为迭代求解。同时，也可以定义松弛因子和收敛公差。

（4）如果为开放辐射腔，则需要对辐射腔定义环境温度或者空间节点。

定义空间温度，执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→Solution Opt 菜单命令，在图 11-17 所示的 Radiation Solution Options 对话框中，SPCTEMP/SPCNOD 项选中 Temperature，在 Value 文本框中输入温度值，在 Enclosure option 下拉列表框中选中 Define，在 If "Define"-enter Encl. Number 文本框中输入辐射腔体的编号。

定义空间节点，执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→Solution Opt 菜单命令，在图 11-17 所示的 Radiation Solution Options 对话框中，SPCTEMP/SPCNOD 项的 Space Option 下拉列表框中选中 Space Node，在 Value 文本框中输入节点编号，在 Enclosure option 下拉列表框中选中 Define，在 If "Define"-enter Encl. Number 文本框中输入辐射腔体的编号。

如果环境为其他的模型，则需要对辐射腔分别定义空间节点。光能传递求解方法将获取所定义的空间节点的温度值作为环境温度值。

步骤 3：定义角度系数求解选项。

无论是 2D 问题还是 3D 问题的求解，均有不同的选项。

（1）半立方体法求解角度系数。半立方体法用于 3D 问题角度系数的求解，可以设定求解阶次，默认值为 10，值越高，求解精度越高。

执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→View Factor 菜单命令，打开图 11-18 所示的 View Factor Options 对话框，如果为 3D 问题，则在 HEMIOPT 项的 Hemicube resolution 文本框中输入求解阶次。

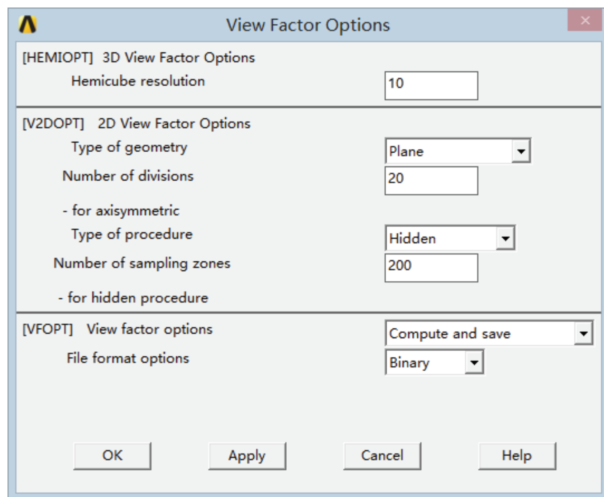


图 11-18 View Factor Options 对话框

（2）2D/轴对称法求解角度系数。半轴对称法用于 2D 问题角度系数的求解，模型形状

可以设置为平面或轴对称，默认为平面问题的求解。对于轴对称问题，还可以设置分割数。

执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→View Factor 菜单命令，在图 11-18 所示的 View Factor Options 对话框中，Type of geometry 项选择 Plane（平面）或 Axisymmetric（轴对称）。若为轴对称问题，则将 Number of divisions 项设为分割数，Type of procedure 项选择 Hidden（隐藏方法）或者 Non-Hidden（非隐藏方法）。

对于 3D 问题和 2D 问题，ANSYS 采用不同的求解算法进行求解，默认为 3D 问题。2D 问题则分为平面问题和轴对称问题，默认为平面问题。轴对称问题会自动扩展为 3D 问题，而 NDIV 项则代表着轴对称分割数。例如，若设定分割数为 10，则每块分隔为 36°。这种扩展仅用于角度系数的计算，并不用于温度求解。

（3）确定角度系数的获取方式，是重新计算还是获取已有的角度系数值。执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→View Factor 菜单命令，在图 11-18 所示的 View Factor Options 对话框中，VFOPT 项选择 Compute and save（计算并保存）、Recommpute and save（如果存在不计算，若不存在则重新计算并保存）、Read from file（从文件中读取）或 Compute and not save（计算但不保存）。

File format options 项选择角度系数输出方式，即二进制或 ASCI 码。

步骤 4：角度系数的计算和查询。

以上定义完成后，就可以进行角度系数的计算了，并且可以对角度系数值进行查询，计算平均角度系数值。

（1）定义和储存角度系数值。执行 Main Menu→Radiation Opt→Radiosity Meth→Compute 菜单命令，打开图 11-19 所示的 View Factor Options 对话框，将 FILE 项设为要存储角度系数的文件名。

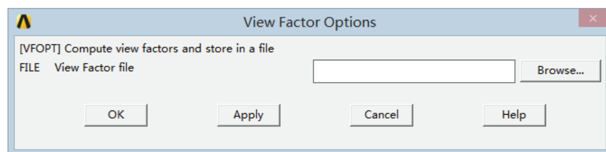


图 11-19 View factor Options 对话框

（2）查询和列表角度系数值。执行 Main Menu→Radiation Opt→Radiosity Meth→Query 菜单命令，拾取要列表角度系数的单元，单击 OK 按钮，可以列表显示角度系数值。

步骤 5：定义其他载荷和求解选项。

定义初始温度、载荷步、载荷子步、载荷施加方式等选项。这些与前面介绍的稳态分析和瞬态分析类似，不再多作介绍。

11.3 实例——非同心圆环间的辐射传热分析

11.3.1 问题描述

图 11-20 所示的两个非同心圆柱之间相互传热，内圆柱外表面的发射率为 0.9，内表面维持温度 800 ℃。外圆柱的内表面发射率为 0.7，外表面温度保持在 35 ℃。两圆环之间的环境温度为 20 ℃。试确定两者之间的热流率。其中，内圆内径 75 mm，外径 150 mm，外圆内

径 250 mm，外径 305 mm，两者圆心偏移 60 mm。

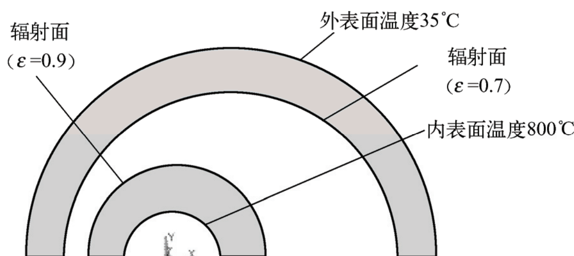


图 11-20 同心圆柱几何模型

11.3.2 问题分析

由于圆柱特别长，因此忽略长度方向的影响，将问题简化为二维平面分析。采用二维热平面单元 PLANE55 单元进行该问题的分析，单位采用国际单位制，温度采用℃。

11.3.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise11”，单击 OK 按钮。

2．定义二维热平面单元 PLANE55

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Type 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Type 对话框，选择“Thermal Solid，Quad 4node 55”，单击 OK 按钮。

在 Element Type 对话框中，选中 Type 1 PLANE55，单击 Options 按钮，弹出 PLANE55 element type options 对话框，K3 项选择 Plane，单击 OK 按钮，在 Element Type 对话框中单击 Close 按钮。

3．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，在弹出的对话框中，将 KXX 项设为 0.05，单击 OK 按钮，完成材料导热系数的定义。

4．建立几何模型

（1）建立内圆环。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus 菜单命令，弹出全圆环定义对话框，在 WP X、WP Y、Rad-1、Theta-1、Rad-2、Theta-2 中依次输入 0、0、0.150、0、0.075、180，如图 11-21 所示，单击 Apply 按钮，完成内圆环的建立。

（2）建立外圆环。继续在 WP X、WP Y、Rad-1、Theta-1、Rad-2、Theta-2 中依次输入 0.06、0、0.305、0、0.25、180，如图 11-22 所示，单击 OK 按钮，完成外圆环的建立。

5．设置单元尺寸并划分网格

（1）设置单元尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize

→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，将 Element edge length 项设为 0.01，单击 OK 按钮。

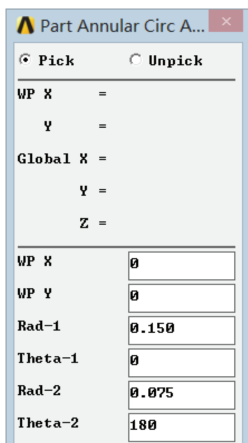


图 11-21　建立内圆环

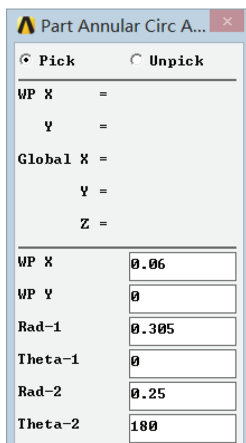


图 11-22　建立外圆环

提示：若没有对模型进行单元属性的定义，则均默认为 1 号单元和 1 号材料。

（2）划分单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→By Corners 菜单命令，弹出 Map Mesh Areas by Corners 面拾取对话框，拾取内圆环，单击 Apply 按钮，弹出 Map Mesh Areas by Corners 角点拾取对话框，依次拾取内圆环的 4 个角点，无顺序要求，单击 Apply 按钮，完成内圆环网格的划分。

弹出 Map Mesh Areas by Corners 面拾取对话框，拾取外圆环，单击 OK 按钮，弹出 Map Mesh Areas by Corners 角点拾取对话框，依次拾取外圆环的 4 个角点，无顺序要求，单击 OK 按钮，完成外圆环网格的划分。

6．施加边界条件

（1）施加发射率载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Radiation→On Lines 菜单命令，弹出 Apply RDSF on Lines 线拾取对话框，拾取内圆外侧线 1，如图 11-23 所示，单击 Apply 按钮。弹出 Apply RDSF on Lines 对话框，将 VALUE 项和 VALUE2 项分别设为 0.9 和 1，如图 11-24 所示，单击 Apply 按钮。

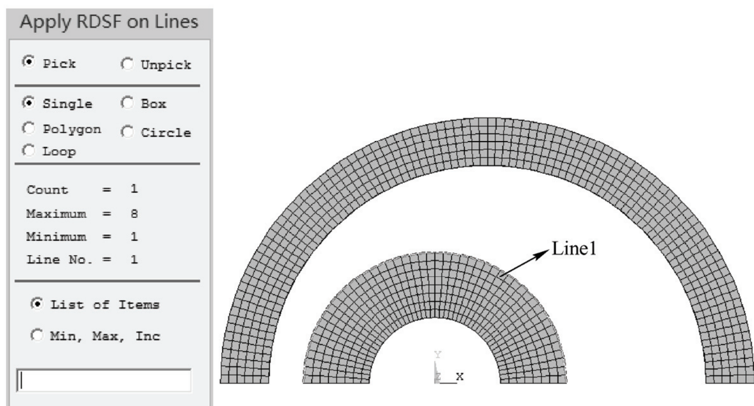


图 11-23　内圆外侧线发射率定义示意图

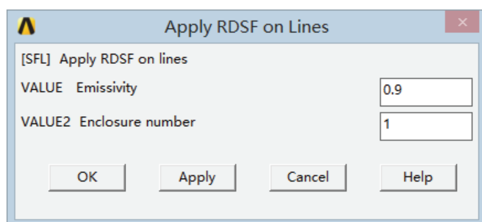


图 11-24 Apply RDSF on Lines 对话框

继续弹出 Apply RDSF on Lines 线拾取对话框，拾取外圆内侧线 7，如图 11-25 所示，单击 OK 按钮。弹出 Apply RDSF on Lines 对话框，将 VALUE 项和 VALUE2 项分别设为 0.7 和 1，单击 OK 按钮。

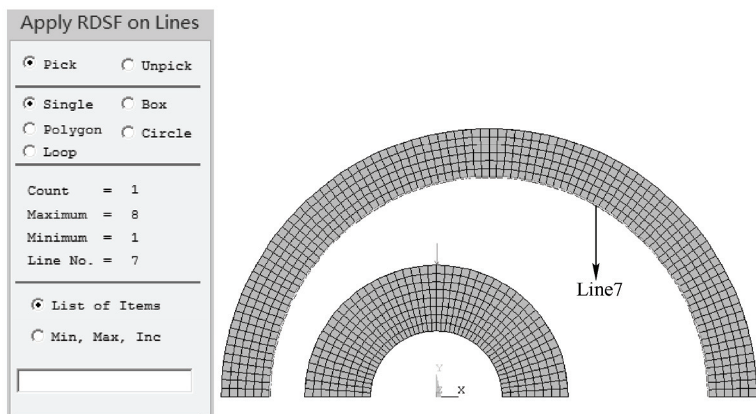


图 11-25 外圆内侧线发射率定义示意图

（2）施加温度载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Lines 菜单命令，弹出温度定义线拾取对话框，拾取图 11-26 所示的 3 号线，单击 Apply 按钮，弹出 Apply TEMP on Lines 对话框，Lab 项选中 TEMP，VALUE 项设为 800，单击 Apply 按钮。

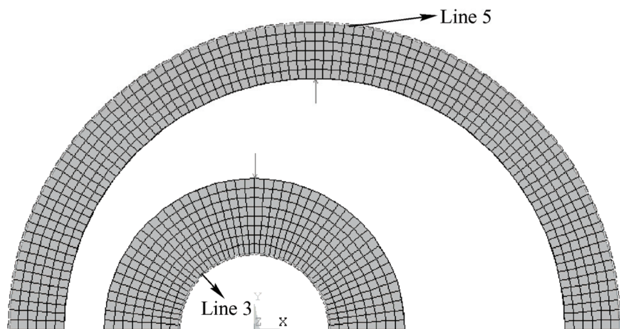


图 11-26 温度定义线拾取编号示意图

继续弹出温度定义线拾取对话框，拾取图 11-26 所示的 5 号线，单击 OK 按钮，弹出

Apply TEMP on Lines 对话框，Lab 项选中 TEMP，VALUE 项设为 35，单击 OK 按钮。

7．定义辐射求解选项

执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→Solution Opt 菜单命令，打开图 11-27 所示的 Radiation Solution Options 对话框。

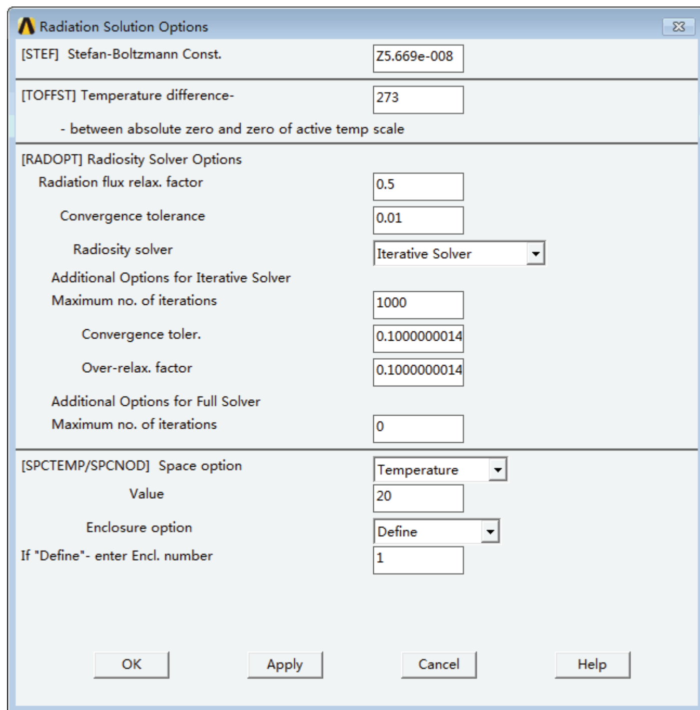


图 11-27 Radiation Solution Options 对话框

（1）定义斯忒藩-波尔茨曼常数，将 STEF 项设为 5.669e-008。

（2）定义温度偏移值。将 TOFFST 项设为 273。

（3）定义辐射求解选项。包括定义求解松弛因子，将 RADOPT 项的 Radiation flux relax.factor 项设为 0.5；定义收敛公差，将 Convergence tolerance 项设为 0.01；选择迭代求解算法，Radiosity solver 项选中 Iterative Solver。单击 OK 按钮。

（4）定义环境温度值。模型为开发体系，定义环境温度为 20 ℃。SPCTEMP/SPCNOD 项的 Space option 项选中 Temperature，Value 项设为 20，Enclosure option 项选中 Define，If "Define"-enter Encl.number 项设为 1。

完成定义后，如图 11-27 所示，单击 OK 按钮，完成辐射求解选项的定义。

8．定义角度系数求解选项

本实例为 2D 问题，进行 2D 问题的设置。执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→View Factor 菜单命令，打开 View Factor Options 对话框，对 V2DOPT 项进行设置。Type of geometry 项选中 Plane，做平面分析；Type of procedure 项选中 Hidden，进行隐藏式算法；VFOPT 项选择 Compute and save（计算并求解）；其他项保留默认设置，如图 11-28 所示，单击 OK 按钮。

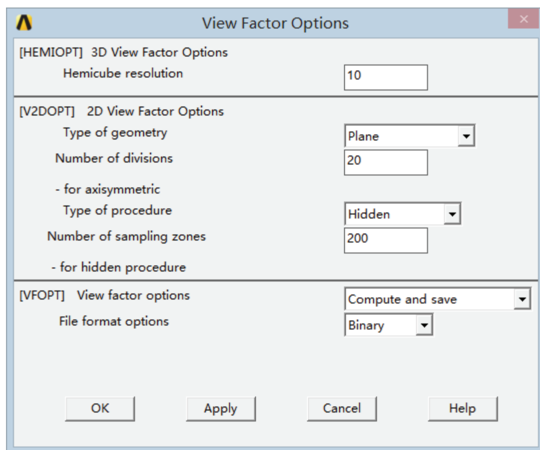


图 11-28 View Factor Options 对话框

9．设置求解选项

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Steady-State，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Time/Frequenc→Time-Time Step 菜单命令，弹出 Time and Time Step Options 对话框。

在对话框中，TIME 项设为 1，DELTIM 项设为 0.5，在 KBC 项选择 Stepped，AUTOTS 项选择 ON。在 DELTIM 项的 Minimum time step size 项设为 0.1，在 DELTIM 项的 Maximum time step size 项设为 1，如图 11-29 所示，单击 OK 按钮。

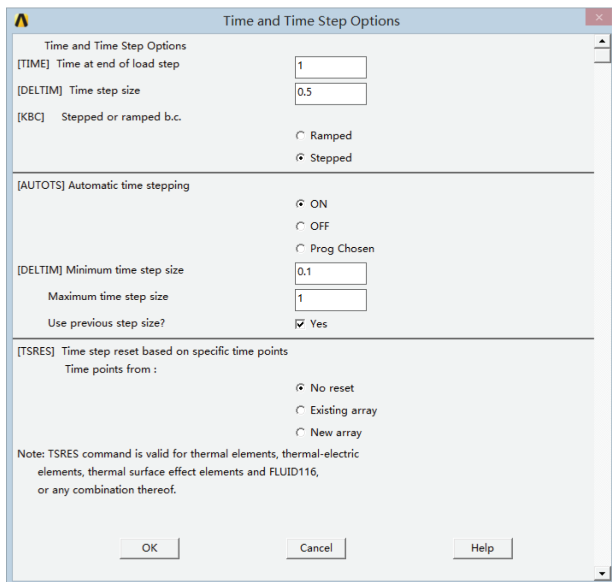


图 11-29 Time and Time Step Options 对话框

执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Nonlinear→Equilibrium Iter 菜单命令，弹出图 11-30 所示的 Equilibrium Iterations 对话框，输入“1000”，单击 OK 按钮，定义迭代次数为 1000。



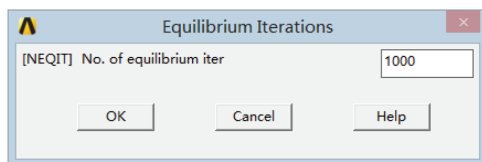


图 11-30 Equilibrium Iterations 对话框

提示：默认的最大迭代次数为 25，若迭代 25 次之后还没有收敛就结束计算。因此，这里需要调大迭代计算次数。

10．存盘和求解

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS Toolbar 中的 Save_DB 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算并存盘。

11．显示温度分布云图

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，在 INF0 中选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示内圆的温度分布。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Areas、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出单元拾取对话框，选中 Min、Max、Inc，输入“1”，单击 OK 按钮，完成内圆面的选取。

执行 Utility Menu→Select→Everything Below→Selected Areas 菜单命令，选中属于面的所有线、单元和节点。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布如图 11-31 所示。

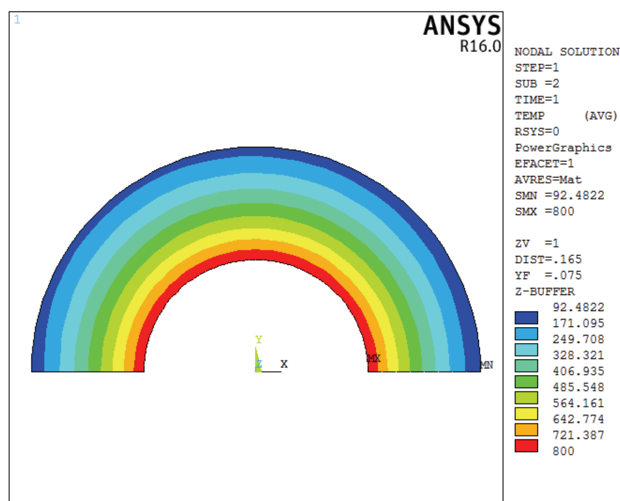


图 11-31 内圆温度分布云图

（3）显示外圆的温度分布。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Areas、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出单元拾取对话框，选中 Min、Max、Inc，输入“2”，单击 OK 按钮，完成外圆面的选取。

执行 Utility Menu→Select→Everything Below→Selected Areas 菜单命令，选中属于面的所有线、单元和节点。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布如图 11-32 所示。

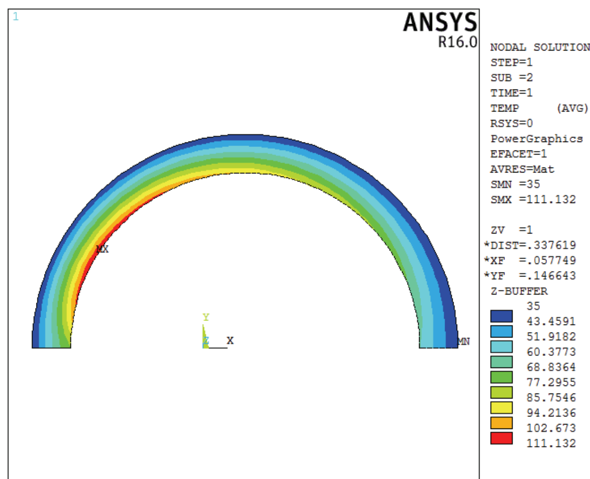


图 11-32　外圆温度分布云图

12．显示内外圆节点热流值

（1）显示内圆节点的热流值。

1）选中内圆内表面线。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Lines、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出线拾取对话框，选中 Min,Max,Inc，输入“3”，单击 OK 按钮，完成内圆内表面线的选取。

2）选中内圆内表面的所有节点。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、Attached to、Lines、all、From Full，单击 OK 按钮，完成内圆内表面上所有节点的选取。

3）列表显示内圆节点的热流值。执行 Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solu 菜单命令，弹出 List Reaction Solution 对话框，Lab 项选中 Heat Flow HEAT，单击 OK 按钮，列出内圆节点的热流量值，如图 11-33 所示。

（2）显示外圆节点的热流值。

1）选中外圆外表面线。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Lines、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出线拾取对话框，选中 Min,Max,Inc，输入“5”，单击 OK 按钮，完成外圆外表面线的选取。

2）选中外圆外表面线的所有节点。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出

Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、Attached to、Lines、all、From Full，单击 OK 按钮，完成外圆外表面上所有节点的选取。

3）列表显示外圆节点的热流值。执行 Main Menu→General Postproc→List Results→Reaction Solu 菜单命令，弹出 List Reaction Solution 对话框，Lab 项选中 Heat Flow HEAT，单击 OK 按钮，列出外圆节点的热流量值，如图 11-34 所示。

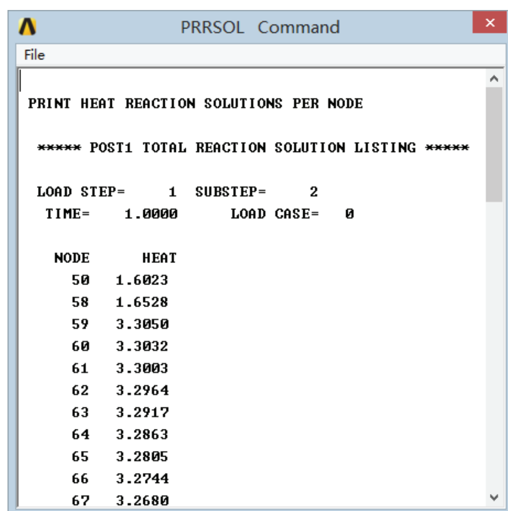


图 11-33 内圆节点的热流量值

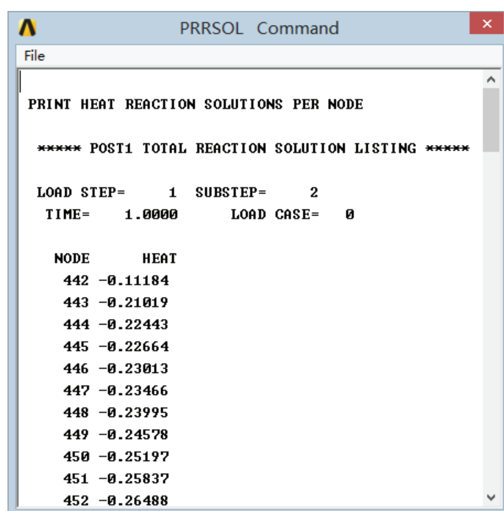


图 11-34 外圆节点的热流量值

13．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

11.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise11
/PREP7                              !进入前处理器
ET,1,PLANE55                        !定义二维热平面单元 PLANE55
KEYOPT,1,3,0                        !设置单元选项
MP,KXX,1,0.05                       !定义导热系数
CYL4,0,0,0.150,0,0.075,180          !建立内圆
CYL4,0.06,0,0.305,0,0.25,180        !建立外圆
ESIZE,0.01                          !设置单元尺寸
AMAP,1,2,3,4,1                      !划分内圆单元
AMAP,2,6,7,8,5                      !划分外圆单元
SFL,1,RDSF,.9, ,1,                  !施加内圆外侧线发射率载荷
SFL,7,RDSF,.7, ,1,                  !施加外圆内侧线发射率载荷
DL,3, ,TEMP,800,1                   !施加内圆外侧线温度载荷
DL,5, ,TEMP,35,1                    !施加外圆内侧线温度载荷
ALLSEL                              !选中所有模型
```

```
STEF,0.5669E-07                 !定义斯忒藩-波尔茨曼常数
TOFFST,273                      !定义温度偏移值
RADOPT,0.5,0.01,0,              !定义辐射求解选项
SPCTEMP,1,20                    !定义环境温度值
V2DOPT,0,20,0,200
VFOPT,OFF, , , ,BINA            !定义角度系数求解选项
FINISH                          !
/SOLU                           !进入求解器
TIME,1                          !定义求解时间
AUTOTS,1                        !打开自动时间步长
DELTIM,0.5,0.1,1,1              !定义时间子步
KBC,1                           !设置为阶跃载荷
NEQIT,1000                      !定义平衡迭代次数
SOLVE                           !求解计算
FINISH
/POST1                          !进入通用后处理器
ASEL,S, , ,        1            !选中内圆面
ALLSEL,BELOW,AREA               !选中内圆面以下的所有图元
PLNSOL, TEMP,, 0                !显示内圆面温度分布云图
ASEL,S, , ,        2            !选中外圆面
ALLSEL,BELOW,AREA               !选中外圆面以下的所有图元
PLNSOL, TEMP,, 0                !显示外圆面温度分布云图
LSEL,S,,,3                      !选中内圆内表面线
NSLL,S,1                        !选中内圆内表面的所有节点
PRRSOL,HEAT                     !列表显示内圆节点的热流值
LSEL,S,,,5                      !选中外圆外表面线
NSLL,S,1                        !选中外圆外表面线的所有节点
PRRSOL,HEAT                     !列表显示外圆节点的热流值
/EXIT,NOSAV                     !退出 ANSYS
```

11.4 本章小结

本章简单介绍了热辐射的特性和基本术语，使读者对辐射传热有了基本的了解；详细讲述了 ANSYS 辐射热分析的 4 种热辐射仿真方法、操作步骤和求解设置，为使用 ANSYS 进行辐射热分析提供操作指导；并通过一个实例分析，使读者掌握 ANSYS 热辐射仿真计算的求解过程和应用。

第12章 相 变 分 析

相变为物质从一种相转变为另一种相的过程，是物体热效应的一种。本章详细介绍了相变分析的基本理论，以及在 ANSYS 中进行相变分析的基本思路。通过 3 种典型的工程应用案例，详述了使用 ANSYS 进行相变分析的基本步骤和使用技巧。

学习目标：

（1）理解相变分析的基本理论;

（2）掌握 ANSYS 进行相变分析的主要步骤和求解设置;

（3）掌握 ANSYS 进行相变分析的基本思路及操作步骤、命令。

12.1 相变基本理论

相是物质的一种确定原子结构的形态，均匀同性。有 3 种基本的相：固体、液体和气体，如图 12-1 所示。相变为系统能量的变化（增加或减少）导致物质的原子结构发生改变。通常的相变过程称为固结、溶化、汽化或凝固。相变过程涉及两个物理量，即潜在热量和焓值。

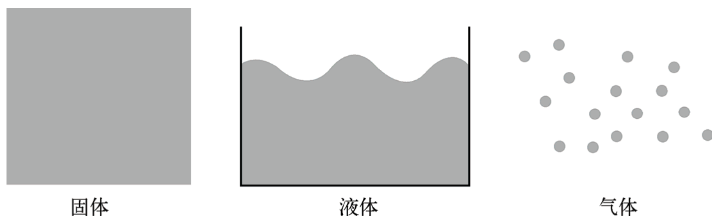


图 12-1 相的示意图

1．潜在热量

当物质相变时，温度保持不变，在物质相变过程中需要的热量称为融化的潜在热量。例如，0 ℃的冰融化为 0 ℃的水，需要吸收热量。

2．焓

在热力学上，焓由下式确定：

$$H = U + PV \qquad (12\text{-}1)$$

式中，H 为焓；U 为内能；P 为压力；V 为体积。

焓在化学热力学中是一个重要的物理量，可以从以下几个方面来理解它的意义和性质。

（1）焓是状态函数，具有能量的量纲。

（2）焓是体系的广度性质，它的量值与物质的量有关，具有加和性。

（3）焓与热力学能一样，其绝对值至今尚无法确定。但状态变化时体系的焓变 ΔH 却是确定的，而且是可求的。

（4）对于一定量的某物质而言，由固态变为液态或液态变为气态都必须吸热，所以

$$H(g) > H(l) > H(s) \tag{12-2}$$

式中，$H(g)$为气体焓值；$H(l)$为液体焓值；$H(s)$为固体焓值。

（5）当某一过程或反应逆向进行时，其 ΔH 要改变符号，即 $\Delta H_{(正)} = -\Delta H_{(逆)}$。

相变分析必须考虑材料的潜在热量，即在相变过程吸收或释放的热量，通过定义材料的热焓特性来计入潜在热量。

经典（热动力学）热焓数值单位是能量单位，为 kJ 或 BTU。单位热焓单位为能量/质量，为 kJ/kg 或 BTU/lbm。在 ANSYS 中，热焓材料特性为单位热焓，如果单位热焓在某些材料中不能使用，它可以用密度、比热容和物质潜在热量得出。如下式：

$$H = \int \rho c(T) \mathrm{d}T \tag{12-3}$$

式中，H 为焓值；ρ 为密度；$c(T)$ 为随温度变化的比热容。

12.2 ANSYS 中的相变分析基本思路及求解设置

相变分析必须考虑材料的潜热，将材料的潜热定义到材料的焓中，其中焓的数值随温度变化。相变过程中，焓的变化相对于温度而言十分迅速。对于纯材料液体温度（T_l）与固体温度（Ts）的差值应该为 0，在计算时，通常取很小的温度差。由此可见，相变分析是非线性的。

12.2.1 相变分析基本思路

在 ANSYS 中，将焓（ENTH）作为材料属性的定义，通过温度的不同来区分相。通过相变分析可以获得物质在各个时刻的温度分布，以及典型位置处节点温度随时间变化的曲线。通过温度云图，可以得到完全相变所需的时间，并对物质任何时间间隔的相变情况进行预测。

1．相变分析控制方程

在相变分析过程中，控制方程：

$$[C]\{\dot{T}_t\} + [K]\{T_t\} = \{Q_f\} \tag{12-4}$$

式中，

$$[C] = \int \rho c [N]^{\mathrm{T}} [N] \mathrm{d}V \tag{12-5}$$

在式（12-5）中计入相变，而在控制方程中，其他两项不随相变改变。

2．焓的计算方法

焓曲线根据温度可以分为 3 个区，在固态温度（*T*s）以下，物质为纯固体；在固体温度（Ts）与液体温度（Tl）之间，物质为相变区；在液体温度（Tl）以上，物质为纯液体。根据比热容及潜热可计算各温度的焓值，如图 12-2 所示。

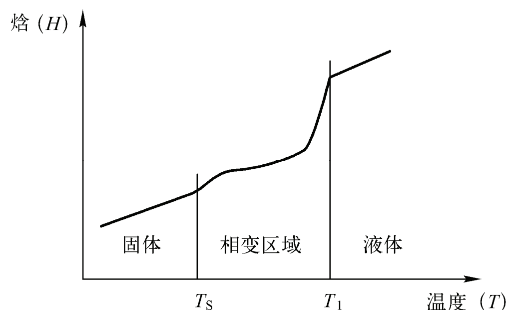


图 12-2　焓值计算示意图

（1）在固体温度以下：$T < T_S$

$$H = \rho C_S (T - T_l) \tag{12-6}$$

式中，C_S 为固体比热容。

（2）在固体温度时：$T = T_S$

$$H_S = \rho C_S (T_S - T_l) \tag{12-7}$$

（3）在固体和液体温度之间（相变区域）：$T_S < T < T_l$

$$H = H_S + \rho C^* (T - T_S) \tag{12-8}$$

$$C_{avg} = \frac{(C_S + C_l)}{2}$$

$$C^* = C_{avg} + \frac{L}{(T_l - T_S)}$$

式中，C_l 为液体比热容，L 为潜热。

（4）在液体温度时：$T = T_l$

$$H_l = H_S + \rho C^* (T_l - T_S) \tag{12-9}$$

（5）超过液体温度时：$T > T_l$

$$H = H_l + \rho C_l (T - T_l) \tag{12-10}$$

下面以铝的热焓数据计算为例，介绍在 ANSYS 中对热焓材料特性的处理方法，此处，铝的焓值没有直接给出，比热容等其他材料性能参数如表 12-1 所示。在计算时，根据铝的熔点选择 T_s=695℃和 T_l=697℃。根据式（12-6）～式（12-9）可以计算热焓，焓值如表 12-2 所示。铝的焓值随温度变化的曲线如图 12-3 所示。

表 12-1　铝的材料性能参数表

材料物理性能	数值
熔点	696℃
密度（ρ）	2707kg/m^3
固体时的比热容（C_S）	896J/kg•℃
液体时的比热容（C_l）	1050J/kg•℃
单位质量的潜热（L）	3956440J/kg
单位体积的潜热（$L\times\rho$）	1.0704e9 J/m^3

表 12-2 铝的各温度下的焓值

温度/℃	焓值/（J/m³）
0	0
695	1.6857e9
697	2.7614e9
1000	3.6226e9

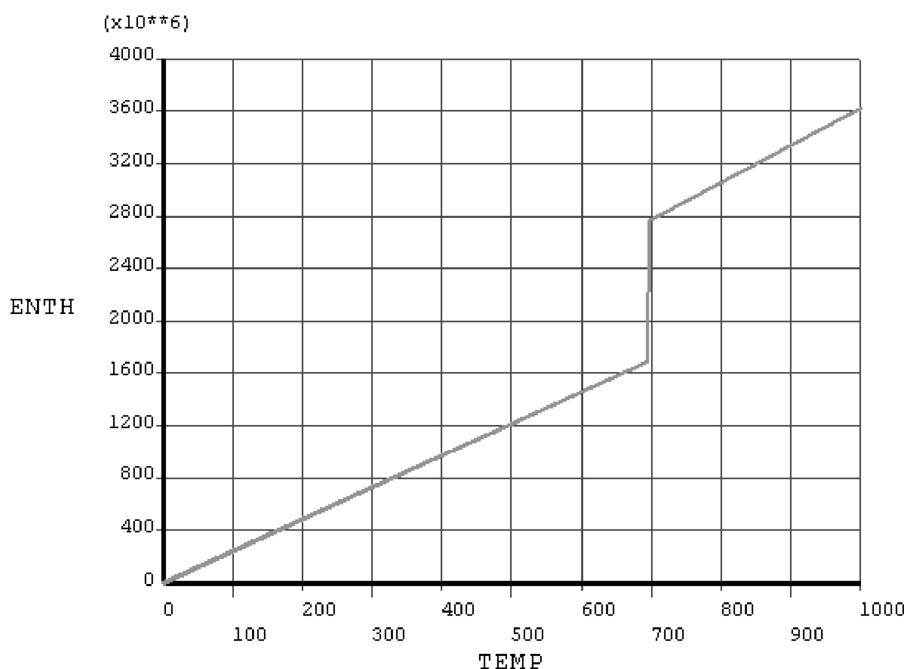


图 12-3 铝的焓值随温度变化的曲线

12.2.2 求解设置

相变问题属于瞬态非线性热分析问题，为保证求解的收敛，采取以下措施。

（1）设定足够小的时间步长，并将自动时间步长设置为 ON。

执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Time/Frequenc→Time-Time Step 菜单命令，弹出 Time and Time Step Options 对话框。设置 AUTOTS 为 ON，在 DELTIM 项中根据实际情况设定较小的时间步长，如图 12-4 所示。

（2）选用低阶的热单元，例如 SOLID70。如果必须选用高阶单元，打开对角比热容矩阵选项，即将单元选项 KEYOPT(1)设置为 1。

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete→Options 菜单命令，在弹出的 SOLID90 element type options 对话框中，在 Specific heat matrix（K1）下拉列表框中选择 Diagonalized，如图 12-5 所示。



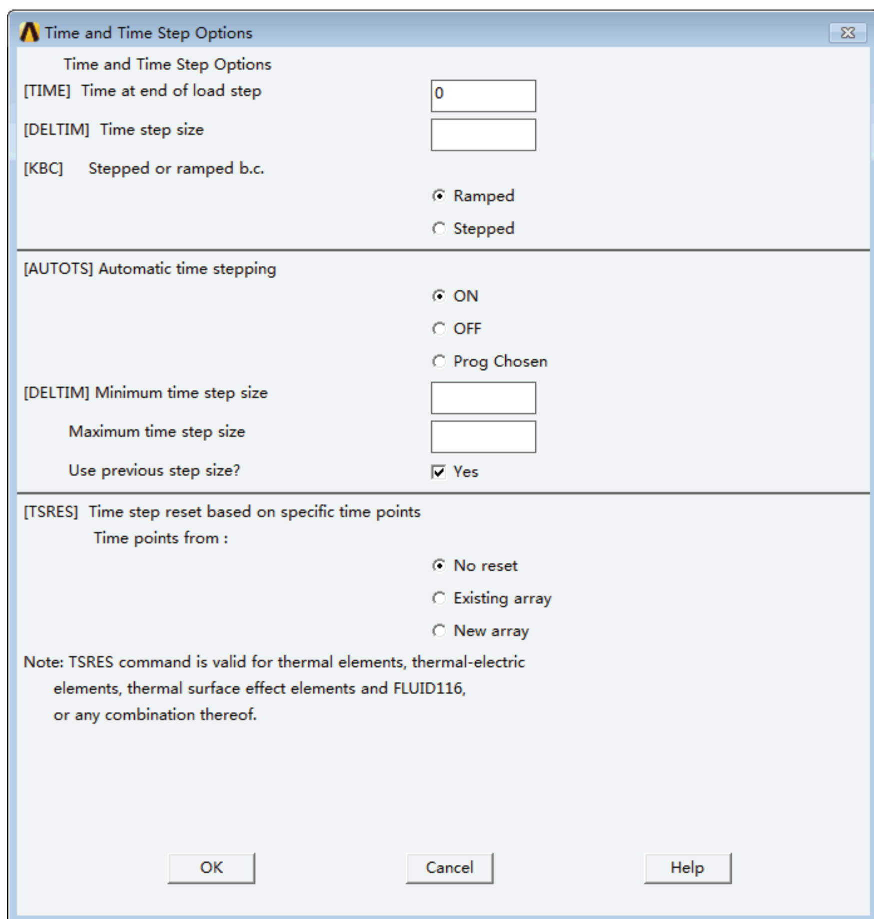


图 12-4　Time and Time Step Options 对话框

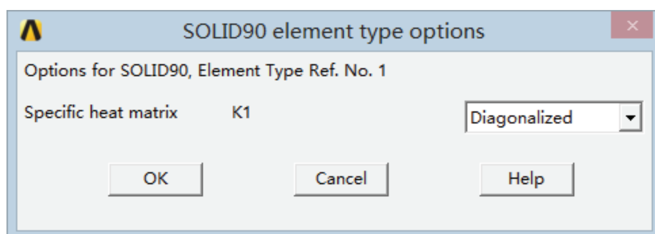


图 12-5　SOLID90 element type options 对话框

（3）在设定瞬态积分参数时，将 THETA 值设置为 1（默认为 1），即设置为反向欧拉时间积分（反向微分），这在求解控制打开时是默认设置。执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Time/Frequenc→Time intergration→Amplitude Decay 菜单命令，在弹出的对话框中，将 THETA 项设为 1，如图 12-6 所示。

（4）将线性搜索设置为 ON。执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Nonlinear→Line Search 菜单命令，选中 ON 单选按钮，如图 12-7 所示。

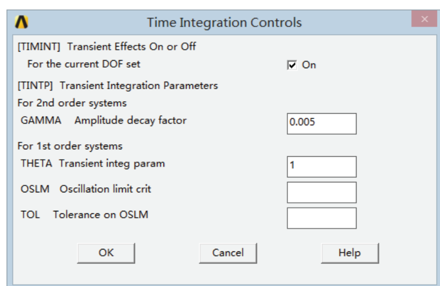


图 12-6 设置瞬态时间积分

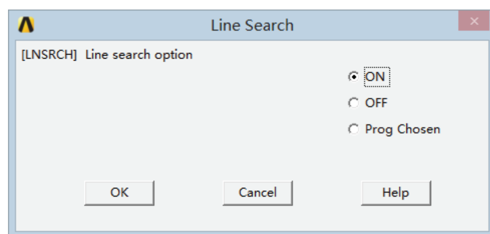


图 12-7 设置线性搜索

12.3 实例——水结冰过程分析

12.3.1 问题描述

本实例对圆柱形水杯中水的结冰过程进行分析，如图 12-8 所示。在一个内径为 45 mm 的圆柱形水杯中盛放着高度为 60 mm 的纯净水，水的初始温度为 0 ℃，环境温度为-15 ℃，水的顶面和侧面对流换热系数为 12.5 W/(m^2• ℃)，试求 1h 后水的温度分布情况，以及在开始后 15 min 水和冰的分布情况。水的材料属性见表 12-3，各温度下的焓值见表 12-4。

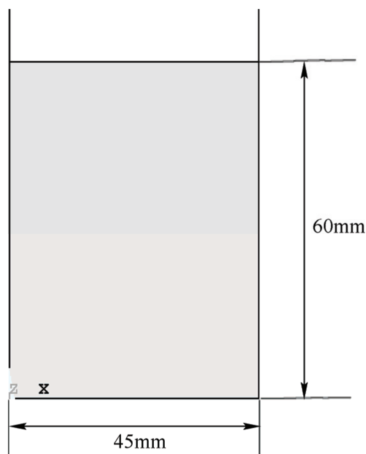


图 12-8 水杯及水几何模型图

表 12-3 水的材料性能参数表

材料物理性能	密度/（kg/m^3）	固体时的比热容/（J/kg•℃）	热传导系数/（W/(m^2• ℃)）
数值	1000	4200	0.6

表 12-4 水在各温度下的焓值

温度/℃	-10	-1	0	10
焓值/（J•m^3）	0	37.8e6	79.8e6	121.8e6

12.3.2 问题分析

本算例属于轴对称问题，可以采用 2D 四节点平面热分析单元 PLANE55 进行有限元分析。单位采用国际单位制，温度采用℃。

12.3.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入 Exercise12，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Type 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Type 对话框，选择 Thermal Solid 和 Quad 4node 55，4 节点二维平面单元，单击 OK 按钮。

在 Element Type 对话框中，选中 Type 1 PLANE55，单击 Options 按钮，弹出 PLANE55 element type options 对话框，选中 K3 Axisymmetric，如图 12-9 所示，单击 OK 按钮。

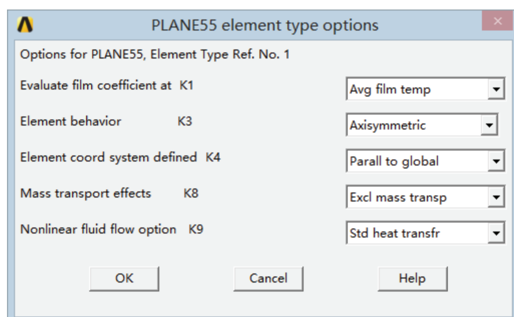


图 12-9 PLANE55 element type options 对话框

3．定义水的材料属性

（1）定义水的密度。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Thermal→Density 菜单命令，弹出 Density for Material Number 1 对话框，定义 1 号材料的密度。将 DENS 项设为 1000，单击 OK 按钮。

（2）定义水的导热系数。继续执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，弹出 Conductivity for Material Number 1 对话框，定义 1 号材料的导热系数。将 KXX 项设为 0.6，单击 OK 按钮。

（3）定义水的比热容。继续执行 Material Models Available→Thermal→Specific Heat 菜单命令，弹出 Specific Heat for Material Number 1 对话框，定义 1 号材料的比热容。将 C 项设为 4200，单击 OK 按钮。

（4）定义水与温度相关的焓参数。继续执行 Material Models Available→Thermal→Enthalpy 菜单命令，弹出 Enthalpy for Material Number 1 对话框，单击对话框左下角的 Add Temperature 按钮，将温度增加到 T4，按照图 12-10 输入材料参数，单击右下角的 Graph 按

钮，水的焓值随温度变化的曲线如图 12-11 所示，然后单击 OK 按钮。

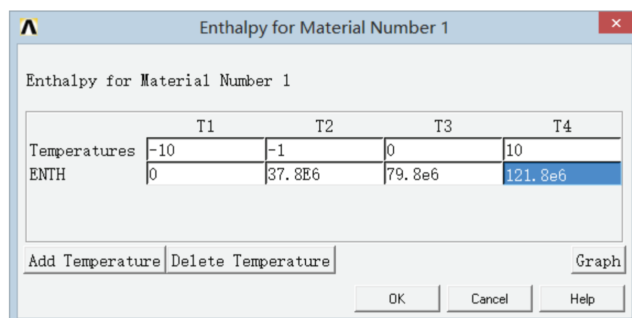


图 12-10 Enthalpy for Material Number 1 对话框

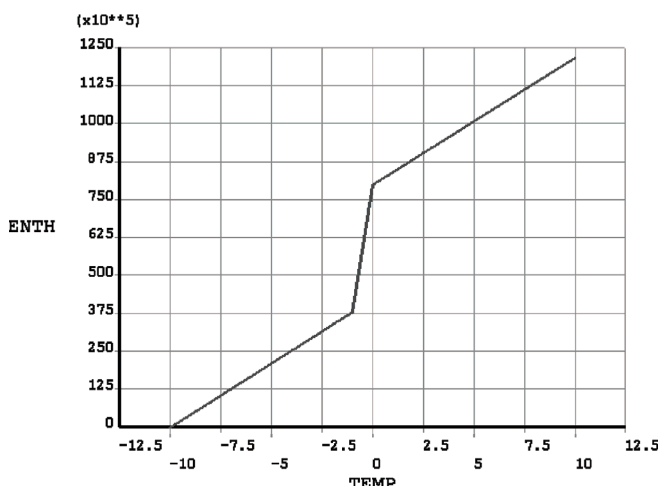


图 12-11 水的焓值随温度变化的曲线

完成以上操作后关闭材料属性定义对话框。

4．建立几何模型

直接建立矩形，执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Rectangle by Dimensions 对话框，在 X1、X2、Y1、Y2 中分别输入 0、0.0225、0、0.06，如图 12-12 所示，单击 OK 按钮建立矩形，如图 12-13 所示。

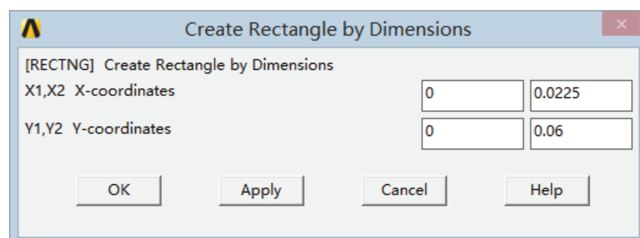


图 12-12 Create Rectangle by Dimensions 对话框

5．设置模型属性和单元尺寸

在不进行任何设置的情况，模型的单元为 Type 1，材料属性为 Material Model Number 1。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，将 Element edge length 项设为 0.002，单击 OK 按钮。

6．划分单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→By Corners 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取模型，弹出关键点拾取对话框，依次拾取面的 4 个关键点，单击 OK 按钮。所得有限元模型如图 12-14 所示。

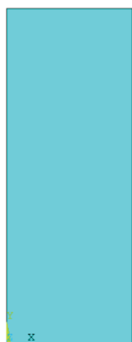


图 12-13 几何模型

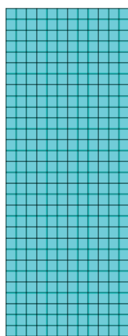


图 12-14 有限元模型

7．施加初始温度

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Initial Condit'n→Define 菜单命令，弹出单元拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出图 12-15 所示的 Define Initial Conditions 对话框，Lab 项选中 TEMP，VALUE 项设为 0，单击 OK 按钮。

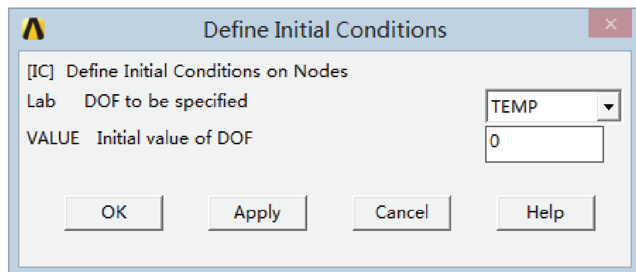


图 12-15 Define Initial Conditions 对话框

8．在顶面和侧面施加对流换热载荷

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Lines 菜单命令，弹出定义对流载荷线拾取的对话框，拾取图 12-16 所示模型的顶面 Line 3 和侧面 Line 2，单击 OK 按钮，弹出 Apply CONV on lines 对话框，将 VAL1I 项设为 12.5，VAL2I 项设为 -20，如图 12-17 所示，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中模型所有组元。

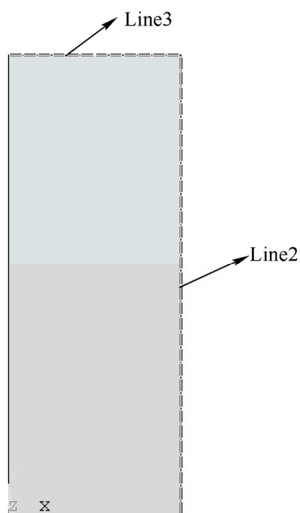


图 12-16 模型线示意图

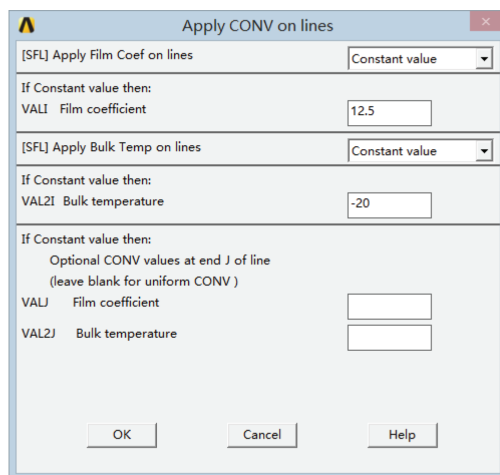


图 12-17 Apply CONV on lines 对话框

9．设置求解选项

（1）定义求解类型。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient，单击 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，接受默认设置，单击 OK 按钮。

（2）定义求解时间。执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Time/Frequenc→Time-Time Step 菜单命令，弹出 Time and Time Step Options 对话框。

在对话框中将 TIME 项设为 2700，DELTIM 项设为 30，在 KBC 中选中 Stepped 单选按钮，AUTOTS 项选择 ON。DELTIM 项的 Minimum time step size 项设为 30，在 DELTIM 项的 Maximum time step size 项设为 60，如图 12-18 所示，单击 OK 按钮。

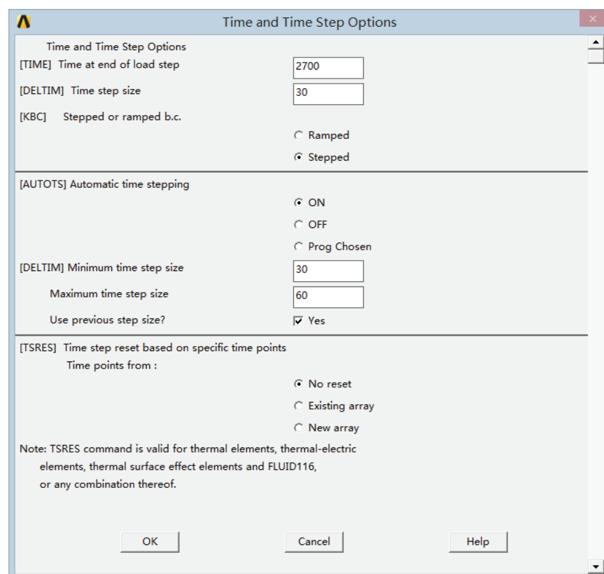


图 12-18 Time and Time Step Options 对话框

（3）设置温度偏移。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命

令，弹出 Static or Steady Analysis 对话框，TOFFST 项设为 273，其他保留默认设置，单击 OK 按钮。

10．输出控制

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，在 Frequency 下拉列表框中选择 Write every substep，如图 12-19 所示，单击 OK 按钮。

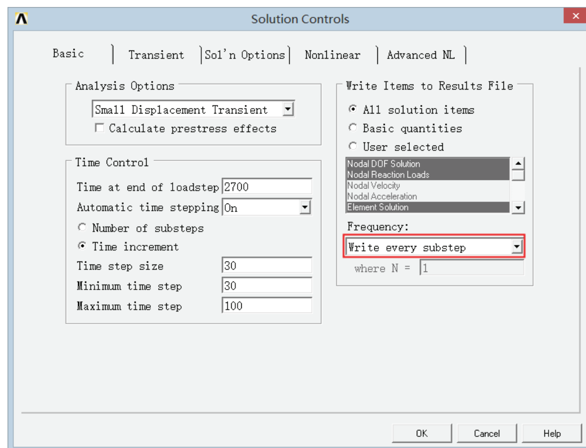


图 12-19　Solution Controls 对话框

11．存盘并求解

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS 工具条中的 Save_DB 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算并存盘。

12．显示沿径向和对称轴高度方向路径温度分布

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

（1）显示沿径向温度分布。

1）定义径向路径。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，拾取图 12-20 所示模型上 Y=0 的所有节点，单击 OK 按钮，弹出 By Nodes 对话框，将 Name 项设为 R1，其他取默认值，如图 12-21 所示，单击 OK 按钮，弹出路径列表，显示路径 R1，节点数 13。

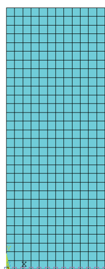


图 12-20　径向路径拾取节点示意图

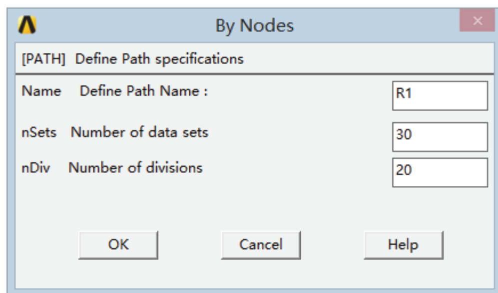


图 12-21　定义径向路径

2）将温度场分析结果映射到径向路径上。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path 菜单命令，弹出图 12-22 所示的 Map Result Items onto Path 对话框，将 Lab 项设为映射标签 TR1，在 Item,Comp Item to be mapped 中选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，单击 OK 按钮，完成温度值到路径 R1 的映射。

3）显示沿径向路径温度分布曲线。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Graph 菜单命令，弹出 Plot of Path Items on Graph 对话框，Lab1-6 项选择 TR1，如图 12-23 所示，单击 OK 按钮，得到图 12-24 所示的沿径向温度分布曲线图。

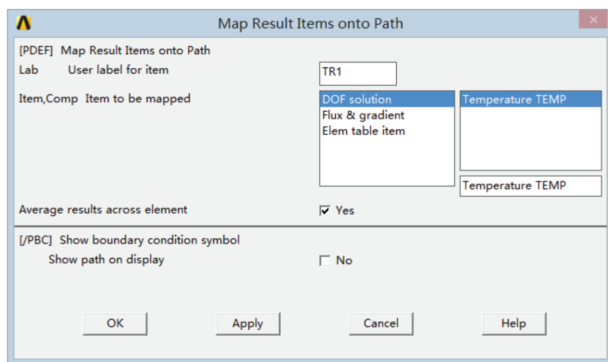


图 12-22　Map Result Items onto Path 对话框

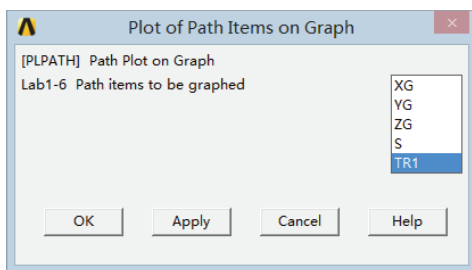


图 12-23　Plot of Path Items on Graph 对话框

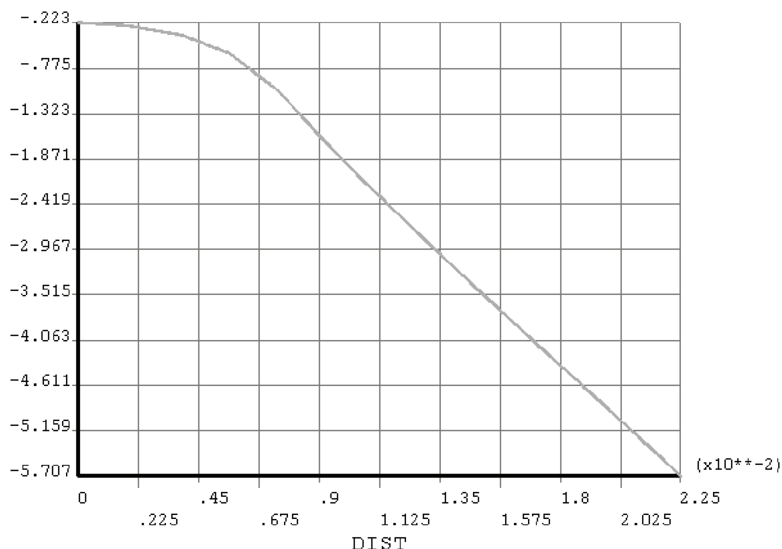


图 12-24　沿径向温度分布曲线图

4）显示沿径向路径温度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Geometry 菜单命令，弹出 Plot of Path Items on Geometry 对话框，Item 项选择 TR1，如图 12-25 所示，其他默认设置，单击 OK 按钮，得到图 12-26 所示的沿径向的路径温度分布云图。

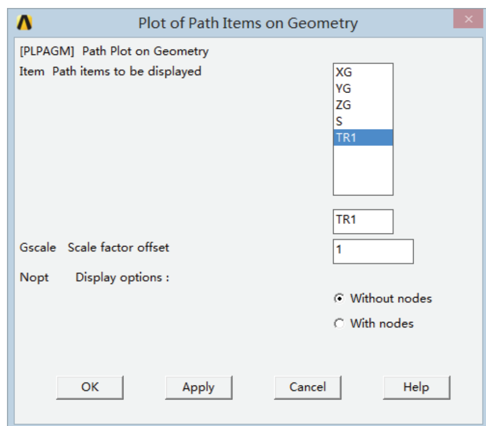


图 12-25 Plot of Path Items on Geometry 对话框

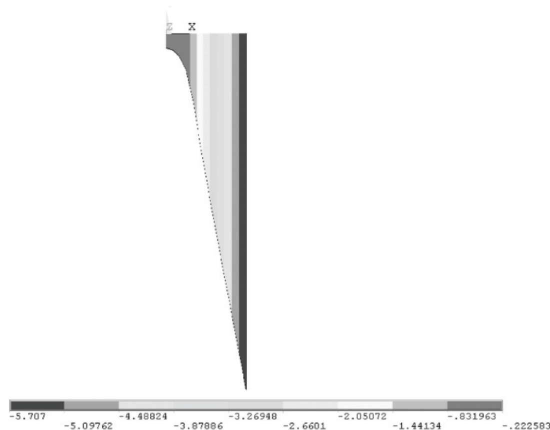


图 12-26 沿径向路径温度分布云图

（2）显示沿高度方向路径温度分布。

1）定义高度方向路径。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Define Path→By Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，拾取图 12-27 所示模型上 X=0 的所有节点，单击 OK 按钮，弹出 By Nodes 对话框，Name 项设为 R2，其他项取默认值，单击 OK 按钮，弹出路径列表，显示路径 R2，节点数 31。

2）将温度场分析结果映射到沿高度方向路径上。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Map onto Path 菜单命令，弹出 Map Result Items onto Path 对话框，Lab 项设为映射标签 TR2，在 Item,Comp Item to be mapped 中选择 DOF solution 和 Temperature TEMP，单击 OK 按钮，完成温度值到路径 R2 的映射。

3）显示沿高度方向路径温度分布曲线。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Graph 菜单命令，弹出 Plot of Path Items on Graph 对话框，Lab1-6 项选择 TR2，单击 OK 按钮，得到图 12-28 所示的沿高度方向的路径温度分布曲线。

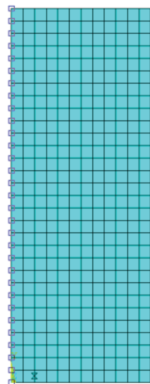


图 12-27 径向路径拾取节点示意图

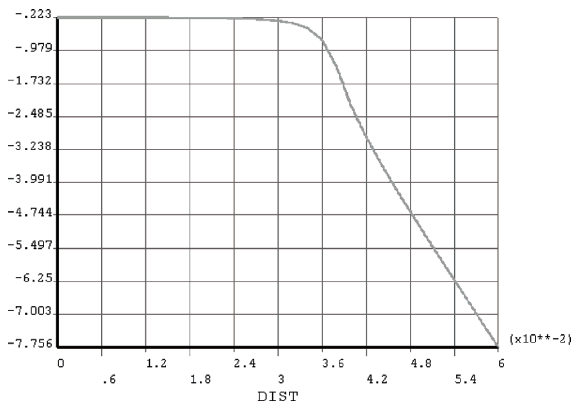


图 12-28 沿高度方向路径温度分布曲线

4）显示沿高度方向路径温度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Path Operations→Plot Path Items→On Geometry 菜单命令，弹出 Plot of Path Items on Geometry 对话框，Item 项选择 TR2，其他项默认设置，单击 OK 按钮，得到图 12-29 所示的沿高度方向

路径温度分布云图。

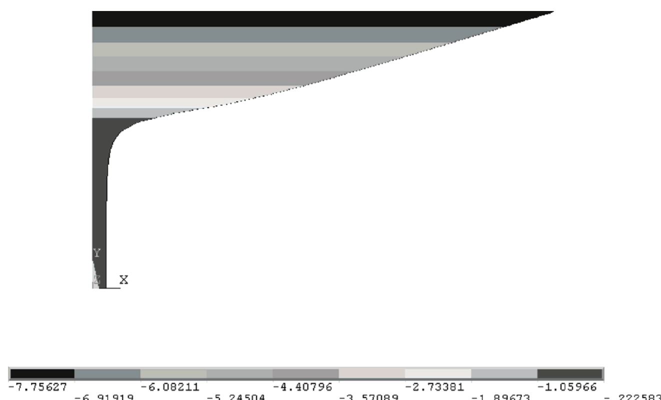


图 12-29　沿高度方向路径温度分布云图

13．显示温度分布云图

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，在弹出的 Window Options 对话框中，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示温度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，在弹出的 Contour Nodal Solution Data 对话框中，选中 Nodal Solution 和 Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布如图 12-30 所示。

（3）将 2D 计算结果扩展至 3D。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Symmetry Expansion→2D Axi-Symmetric 菜单命令，弹出图 12-31 所示的 2D Axi-Symmetric Expansion 对话框。

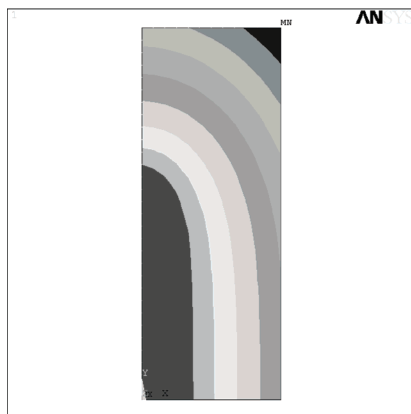


图 12-30　水的温度分布云图

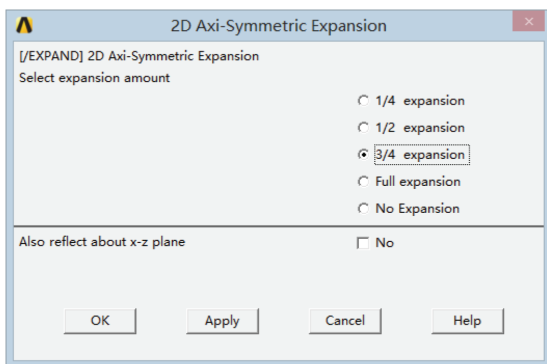


图 12-31　2D Axi-Symmetric Expansion 对话框

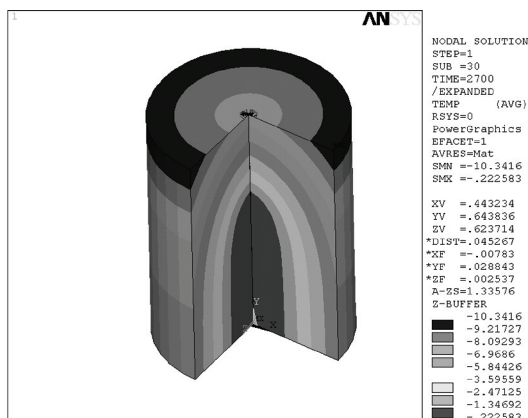
Select expansion amount 项选择 3/4 expansion，单击 OK 按钮，得到扩展的温度分布云图如图 12-32 所示。

14．生成水结冰过程动画

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Over Results，弹出如图 12-33 所示的 Animate Over Results 对话框，在 Auto contour scaling 中设置 Off，在 Display Type 中选中 DOF



solution 和 Temperature TEMP，单击 OK 按钮，可观看水结冰过程的温度分布变化情况。



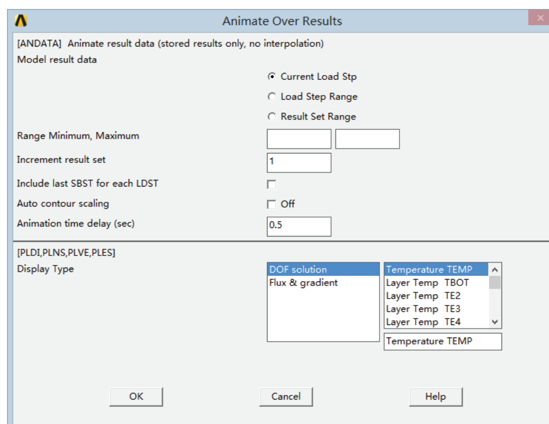


图 12-32　水三维扩展的温度分布云图　　　　图 12-33　Animate Over Results 对话框

分别截取第 10 个载荷步和第 20 个载荷步的温度分布情况，如图 12-34 和图 12-35 所示。

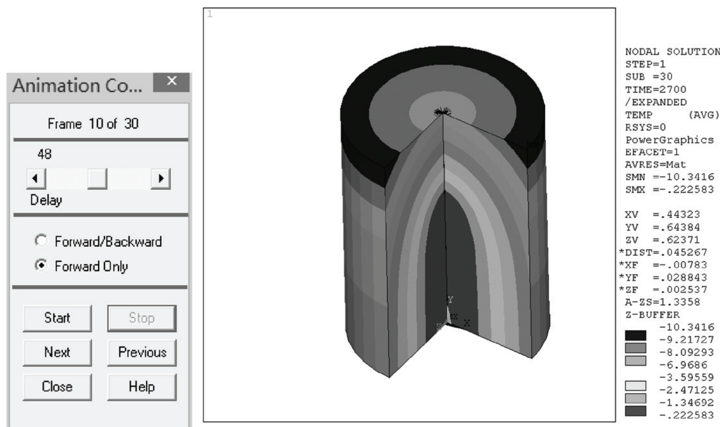


图 12-34　第 10 个载荷步温度分布云图

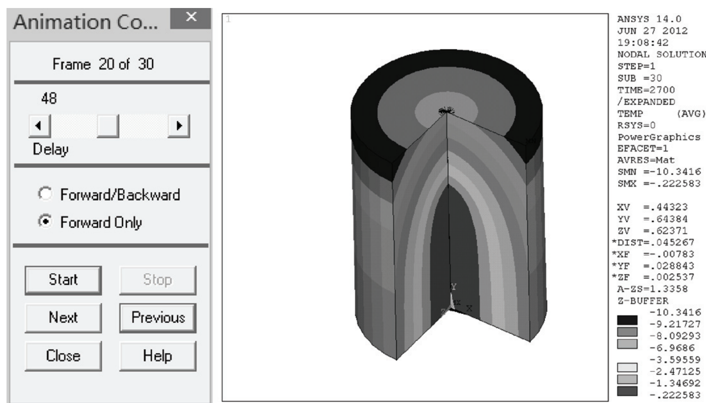


图 12-35　第 20 个载荷步温度分布云图

在动画执行过程中，执行 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Save Animation 菜单命令，可存储动画，当观看完动画后，单击图 12-34 和图 12-35 中的 Animation Controller 的 Close 按钮，结束动画放映。

15. 显示水和冰的区域

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Contours→Non-uniform Contours 菜单命令，弹出图 12-36 所示的 Non-uniform Contours 对话框，将对话框中 V1 和 V2 项分别设为-1 和-0.04，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，在弹出的 Contour Nodal Solution Data 对话框中，选中 Nodal Solution 和 Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度场分布云图如图 12-37 所示。

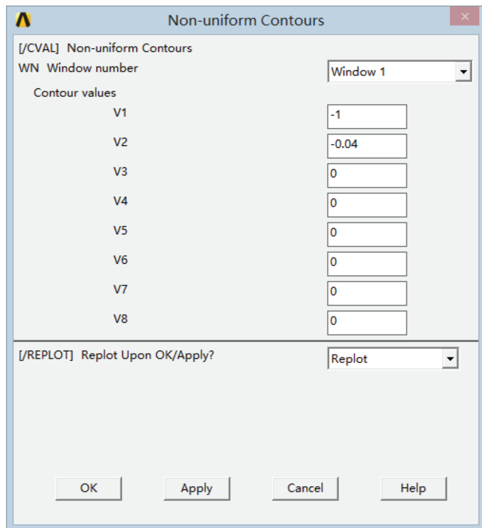


图 12-36 Non-uniform Contours 对话框

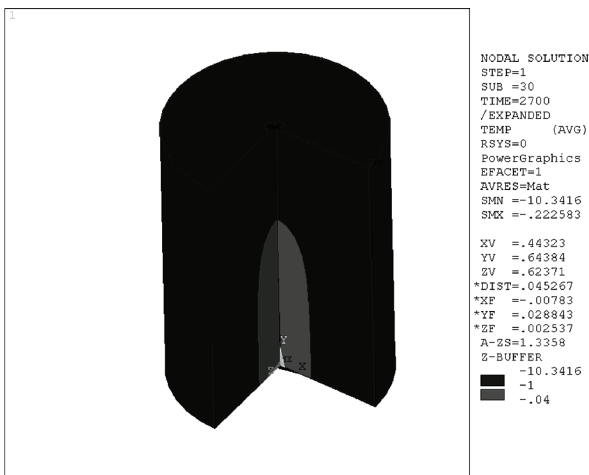


图 12-37 45min 后的温度场分布云图

从图 12-37 中可见，里面的红色区域为没有结成冰的水，外面的蓝色区域为结冰的区域（由于图书为黑白印刷，具体请结合网盘附赠资料学习）。

16. 显示水中的节点温度随时间变化曲线图

（1）取消三维扩展并确定显示节点。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Symmetry Expansion→No Expansion 菜单命令，取消三维扩展。

图 12-38 所示为要定义的 9 个节点变量的位置及编号示意图。

（2）定义变量。执行 Main Menu→TimeHistPostpro 菜单命令，弹出 Time History Variable 对话框。或者关闭之后执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Variable Viewer，打开该对话框。

单击+按钮，弹出如图 12-39 所示的 Add Time-History Variable 对话框，依次选择 Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature，单击 Apply 按钮，弹出节点拾取对话框，输入 1，按〈Enter〉键确认，单击 Apply 按钮。建立变量 TEMP_2，重复以上操作，依次输入 8、2、69、245、30、44、50 和 14。建立变量 TEMP_3、TEMP_4、TEMP_5、TEMP_6、

TEMP_7、TEMP_8 和 TEMP_9。

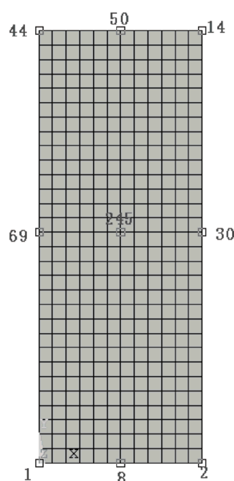


图 12-38　所要显示节点示意图

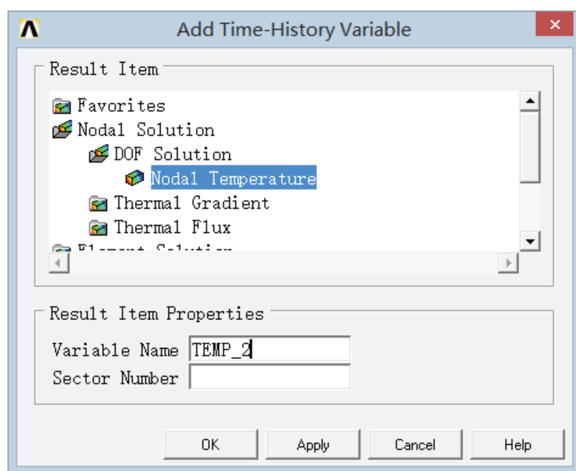


图 12-39　Add Time-History Variable 对话框

完成以上操作后，变量编辑对话框如图 12-40 所示。

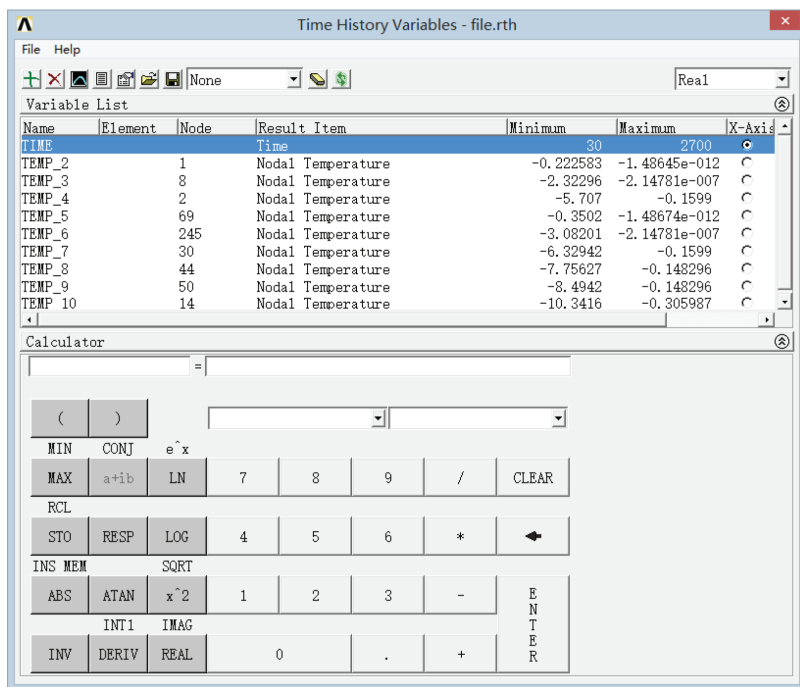


图 12-40　Time History Variables-file.rth 对话框

（3）编辑时间变量显示方式。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes 菜单命令，弹出图 12-41 所示的 Axes Modifications for Graph Plots 对话框。/AXLAB 项分别设为 TIME 和 TEMPERATURE，/XRANGE 项选择 Auto calculated，XMIN 和 XMAX 项分别设为 0 和 2700，单击 OK 按钮。

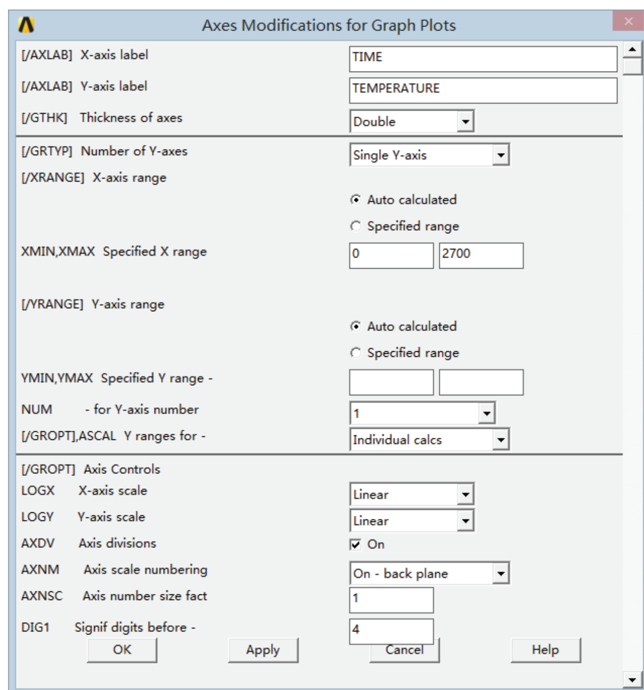


图 12-41 Axes Modifications for Graph Plots 对话框

（4）绘制节点温度随时间的变化曲线。

在图 12-40 所示的 Time History Variables 对话框中，按住〈Ctrl〉键的同时依次选中 TEMP_2、TEMP_3、TEMP_4、TEMP_5、TEMP_6、TEMP_7、TEMP_8 和 TEMP_9，单击图标，曲线如图 12-42 所示。

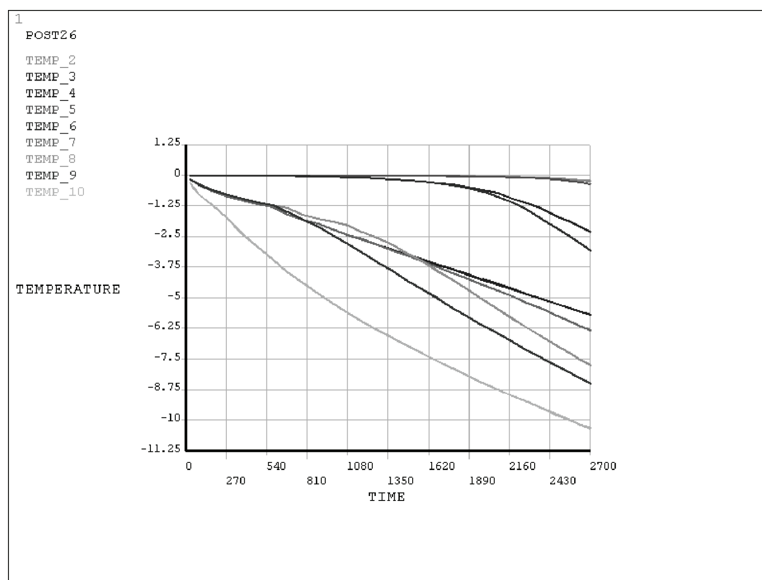


图 12-42 水中 9 个节点的温度随时间变化的曲线图

17．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

12.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise12
/PREP7                                  !进入前处理器
ET,1,PLANE55                            !定义单元类型
KEYOPT,1,3,1                            !设置单元选项
MP,DENS,1,1000                          !定义水的密度值
MP,KXX,1,0.6                            !定义水的热传导系数
MP,C,1,4200                             !定义水的比热容
MPTEMP,1,-10,-1,0,10
MPDATA,ENTH,1,1,0,37.8E6,712.8E6,121.8E6  !定义水与温度相关的焓值
RECTNG,0,0.0225,0,0.06,                 !建立水的几何模型
ESIZE,0.002,0,                          !定义单元尺寸
AMAP,1,4,3,2,1                          !划分单元
FLST,2,403,1,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-403
IC,P51X,ALL,0,                          !施加初始温度值
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,-3
SFL,P51X,CONV,12.5, ,–20,               !在模型顶面和侧面施加对流换热载荷
/SOLU                                   !进入求解器
ALLSEL,ALL                              !选中所有模型
ANTYPE,TRANS                            !定义为瞬态热分析
TIME,2700                               !定义求解时间
AUTOTS,1                                !打开自动时间步长
DELTIM,30,30,100,1                      !定义时间子步
KBC,1                                   !设置为阶跃载荷
TOFFST,273                              !定义温度偏移
OUTRES,ALL,ALL                          !输出控制
SOLVE                                   !进行求解
/POST1                                  !进入通用后处理器
FLST,2,13,1
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,8
```



```
FITEM,2,9
FITEM,2,10
FITEM,2,11
FITEM,2,12
FITEM,2,13
FITEM,2,2
PATH,R1,13,30,20,
PPATH,P51X,1
PATH,STAT                      !定义径向路径
PDEF,TR1,TEMP, ,AVG            !将温度场分析结果映射到径向路径上
/PBC,PATH, ,0
PLPATH,TR1                     !显示沿径向路径温度分布曲线
PLPAGM,TR1,1,Blank             !显示沿径向路径温度分布云图
FLST,2,31,1
FITEM,2,1
FITEM,2,84
FITEM,2,83
FITEM,2,82
FITEM,2,81
FITEM,2,80
FITEM,2,79
FITEM,2,78
FITEM,2,77
FITEM,2,76
FITEM,2,75
FITEM,2,74
FITEM,2,73
FITEM,2,72
FITEM,2,71
FITEM,2,70
FITEM,2,69
FITEM,2,68
FITEM,2,67
FITEM,2,66
FITEM,2,65
FITEM,2,64
FITEM,2,63
FITEM,2,62
FITEM,2,61
FITEM,2,60
FITEM,2,59
FITEM,2,58
FITEM,2,57
FITEM,2,56
FITEM,2,44
PATH,R2,31,30,20,
```

```
PPATH,P51X,1                    !定义高度方向路径
PATH,STAT
PDEF,TR2,TEMP, ,AVG             !将温度场分析结果映射到沿高度方向路径上
/PBC,PATH, ,0
PLPATH,TR2                      !显示沿径向路径温度分布曲线
PLPAGM,TR2,1,Blank              !显示沿径向路径温度分布云图
PLNSOL, TEMP,, 0                !显示温度分布云图
/EXPAND,27,AXIS,,,10            !对模型进行 3D 扩展
PLNSOL, TEMP,, 0                !显示温度分布云图
PLNS,TEMP,
ANDATA,0.5, ,0,0,0,1,0,0        !生成水结冰过程动画
/CVAL,1,-1,-0.04,0,0,0,0,0,0
SET,LAST
/EFACET,1
PLNSOL, TEMP,, 0                !显示水和冰的区域
/EXPAND,
/POST26                         !进入时间-历程后处理器
NSOL,2,1,TEMP,, TEMP_2
NSOL,3,8,TEMP,, TEMP_3
NSOL,4,2,TEMP,, TEMP_4
NSOL,5,69,TEMP,, TEMP_5
NSOL,6,245,TEMP,, TEMP_6
NSOL,7,30,TEMP,, TEMP_7
NSOL,8,44,TEMP,, TEMP_8
NSOL,9,50,TEMP,, TEMP_9
NSOL,10,14,TEMP,, TEMP_10       !定义某些位置节点的时间温度变量
/AXLAB,X,TIME                   !设定横坐标标识为时间
/AXLAB,Y,TEMPERATURE            !设定纵坐标标识为温度
/XRANGE,0,2700                  !设定横坐标轴范围
PLVAR,2,3,4,5,6,7,8,9,10,       !绘制 9 节点温度随时间的变化曲线
FINISH
/EXIT,NOSAV                     !退出 ANSYS
```

12.4 本章小结

本章简单介绍了相变分析的基本理论，使读者对相变的过程有了基本了解；对 ANSYS 相变分析的基本思路和求解设置进行了详细地讲述，为读者进行 ANSYS 相变分析提供操作指导；并通过一个简单实例的实践操作，使读者掌握 ANSYS 相变分析的求解过程和应用方法。



第 13 章　静力学分析

静力学分析是计算在固定不变载荷作用下结构的响应，它不考虑惯性和阻尼的影响，但可以计算固定不变的载荷对结构的影响，如重力和离心力等；随时间变化比较缓慢，可以等效为静载荷的影响，如建筑中的风载荷等。用户可以通过计算得到载荷引起的结构位移、应力和应变等。

静力分析可以是线性的，也可以是非线性的。其中，非线性的类型有大应变、塑性、蠕变、应力刚化、接触单元、超弹性单元等，本章只研究线性分析。

学习目标：

（1）了解有限元线性分析理论基础；

（2）掌握静力学分析的分析步骤；

（3）学会建立有限元模型的各种不同载荷的加载；

（4）掌握结果分析的相关操作。

13.1　有限元线性分析基本理论

固体力学的理论（材力、弹力、结构力学，无论是线性还是非线性）是建立在本构方程、几何（运动）方程以及平衡方程 3 方面方程的基础上的，由此导出的控制方程的解是满足上述充分必要条件的唯一解，而且是反映了结构真实受载后的运动状态（变形）。

在许多结构分析情况下，本构方程和几何方程可以处理成线性。使控制方程线性化后，求解也大大简化，同时可达到工程上的精度要求，这就是线性有限元的基本理论。

13.1.1 线性本构关系（广义虎克定律）

影响结构材料性能的因素有很多，如应力、应变、变形率、温度、湿度、时效等，而通常建立本构方程时仅考虑应力和应变两个物理参数，著名的虎克定律（经典的弹性理论）即认为两者呈线性关系。

各向同性材料的虎克定律

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}\varepsilon_{kl} \text{ 或 } \varepsilon_{ij} = C_{ijkl}\sigma_{kl} \qquad (13\text{-}1)$$

其中，D_{ijkl} 和 C_{ijkl} 分别为弹性矩阵和柔度矩阵。

由剪应力互等定理，弹性阵 $D_{ijkl}\left(9\times9\right)$ 独立材料参数的个数由 81 个减少为 21 个。进而对于正交异性的材料参数为 9 个独立的参数，对于各向同性材料：

$$\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^{e} = \frac{1}{2G}\mathrm{d}S_{ij} + \frac{1-2\nu}{E}\mathrm{d}\sigma_0\delta_{ij}; \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad i,j=1,2,3 \qquad (13\text{-}2)$$

仅有两个独立的材料常数，即 E 和 ν ，其中 E 为弹性模量，ν 为泊松比。

13.1.2 线性几何方程（小变形情况）

线性（小变形）关系：

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}\left(U_{i,j}+U_{j,i}\right)=(\Delta)^{\mathrm{T}}\{U\} \tag{13-3}$$

位移边界条件：S_u 边界上 $U=\overline{U}$ ，其中 U 为位移向量，$\overline{U}$ 为边界 S_u 上的指定位移，$(\Delta)^{\mathrm{T}}$ 为微分算子。

实际结构可根据它们的几何特点，将三维问题简化为二维问题，这里主要有平面应力、平面应变和轴对称状态。

外力仅作用在平面内，两表面无外力作用（离心力作用下圆盘）两表面应力分量（且在整个厚度方向上），$\sigma_{yz}=\sigma_{xz}=\sigma_{zz}=0$，而 σ_{xx} 、σ_{yy} 、σ_{xy} 沿厚度均匀分布。

按照虎克定律，

$$\begin{aligned}&\varepsilon_{xx}=\frac{\partial u}{\partial x}\;;\;\varepsilon_{yy}=\frac{\partial v}{\partial y};\;2\varepsilon_{xy}=\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\\&\varepsilon_{zz}=-\left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)\left(\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}\right)\\&\varepsilon_{zz}=\varepsilon_{xz}=\varepsilon_{yz}=0\end{aligned} \tag{13-4}$$

得弹性矩阵：

$$[D]=\left[E/(1-\nu^2)\right]\begin{bmatrix}1&\nu&0\\\nu&1&0\\0&0&\frac{1-\nu}{2}\end{bmatrix} \tag{13-5}$$

13.1.3 平衡方程（虚功原理）

经典力学给出了结构的平衡方程：

$$\sigma_{ji,j}+f_i=0\quad\text{或}\quad\sigma_{ij,i}+f_j=0 \tag{13-6}$$

边界条件为 $\sigma_{ji}l_j=f_i$ 或 $t_i=t_e$ 在 $S=S_\sigma$ 上。

σ_{ij} 为应力张量，f_i 为体力，t_i 为结构内力，t_e 为外部表面力，直接由平衡方程导出适合各类边界条件的有限元控制方程是困难的，但是从经典的虚功原理或加权余量原理出发，可得到广泛使用的有限元控制方程。

虚功原理认为：一个处于平衡的物体，当发生满足位移边界条件的连续（微小）虚位移 δu_i 时，其外力虚功等于物体中应力在虚应变 $\delta\varepsilon_{ij}$ 上产生的变形能。其表达式：

$$\int_V\sigma_{ij}\delta\varepsilon_{ij}\mathrm{d}V=\int_V f_i\delta u_i\mathrm{d}V+\int_S t_e\delta u_i\mathrm{d}S \tag{13-7}$$

其中，$\delta\varepsilon$ 为对应 δu （虚位移）的虚应变，而虚位移应满足位移—应变的几何关系 $\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}\left(u_{i,j}+u_{j,i}\right)$ 和位移边界条件 $U=\overline{U}$ 。

以位移作为基本未知量的方程是当今有限元的主流称为位移法（位移模型），一个变形体总位能π为：$\pi = U - W$。式中，U是变形能，W是外力功，按虚功原理

$$\delta\pi = \delta U - \delta W = 0 \tag{13-8}$$

按照变分运算规则，仅对位移取变分，而力和应力不变，因此

$$\delta U = \int_V \sigma_{ij}\delta\varepsilon_{ij}\mathrm{d}V \text{，}\quad \delta W = \int_V f_i\delta u_i\mathrm{d}V + \int_S t_i\delta u_i\mathrm{d}S \tag{13-9}$$

按照上述能量原理，产生了多种求解结构位移的方法，如李兹法、伽辽金法等。有限元法与经典李兹法的一个重要区别：有限元法不寻求在结构整个域上的连续位移函数，而是寻找各个子域（单元）上满足域内及域边界上连续的位移函数。

设将物体分成若干个互不重叠的单元（包括三角单元、矩形单元等），对每个单元，设节点位移$\{Q\}$未知量，在单元内部和边界上满足位移协调条件的插值函数 N。于是，体内位移场：

$$\{U\} = \{N\}\{Q\} \tag{13-10}$$

代入几何关系式（13-3）可得

$$\{\varepsilon\} = \{\Delta\}^{\mathrm{T}}\{N\}\{Q\} = \{B\}\{Q\} \tag{13-11}$$

其中，$\{\Delta\}^{\mathrm{T}}$为式（13-3）式中的微分算子。将其代入方程（13-8），则有

$$\{\delta q\}^{\mathrm{T}}\int_V [B]^{\mathrm{T}}\{\sigma\}\mathrm{d}V = \{\delta q\}^{\mathrm{T}}\int_V [N]^{\mathrm{T}}\{f\}\mathrm{d}V + \{\delta q\}^{\mathrm{T}}\int_{S\sigma}[N]^{\mathrm{T}}\{t\}\mathrm{d}S \tag{13-12}$$

进一步将本构关系$[D]$代入，上式成为：

$$[K][q] = [F] + [T] \tag{13-13}$$

其中：

$$\begin{aligned} &[K] = \sum\int_V [B]^{\mathrm{T}}[D][B]\mathrm{d}V \text{ 单元刚度矩阵；} \\ &[F] = \sum\int_V [N]^{\mathrm{T}}\{f\}\mathrm{d}V \text{ 作用于节点的当量体力；} \\ &[T] = \sum\int_{S\sigma}[N]^{\mathrm{T}}\{t\}\mathrm{d}S \text{ 作用于节点的表面力。} \end{aligned} \tag{13-14}$$

这里的$\sum$是指整个物体中所有单元求和，积分仅对每个单元域，这样在实际计算中对各单元可用单元自身坐标系（局部坐标），然后通过坐标转换成总体坐标后再进行叠加。

13.2 实例1——带孔板静力分析

下面通过一个简单的带孔板料刚度强度分析来了解静力学分析的基本流程，具体的每个步骤在后边章节会有详细介绍。本例旨在帮助读者了解静力分析的基本操作过程。

13.2.1 问题描述

图 13-1 所示，40 钢钢板的尺寸为 500 mm×70 mm×8 mm，中轴线靠近两端 100 mm 分别有一个 R=20 mm 孔，其中一端为固定，另一端为自由状态，同时在一面上分布有线载荷 F=7kN，请用 ANSYS APLD 求解出应力与应变的分布云图（弹性模量 E=200 GPa 泊

松比 0.28）。

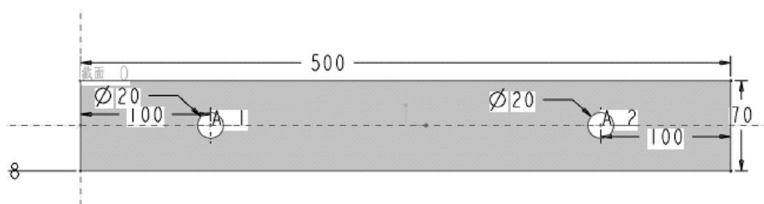


图 13-1　分析案例几何图形

13.2.2 问题分析

本实例属于典型的静力学分析，专业的 CAD 软件较 ANSYS 软件建模效率高，节省建模时间，尤其适用于大型复杂模型。本实例采用 PROE 中已建立的模型导入 ANSYS 中进行，采用单元 SOLID186 进行有限元分析。模型尺寸为毫米制，因此应力和弹性模型为 kPa。

13.2.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise13-1”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Type 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Solid 和 20 node 186，20 节点 SOLID186 单元，如图 13-2 所示，单击 OK 按钮。

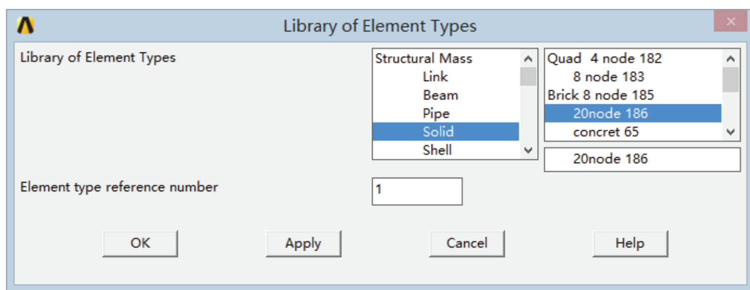


图 13-2　Library of Element Types 对话框

选择到有 20 节点的砖块六面体单元，这个单元在实体模型单元中适应性最好，计算有 20 个节点反应信息也多，不过带来计算量的增加。

3．导入模型文件

执行 File→Import→Creo-Parame 菜单命令，在弹出的对话框中选择具体位置，如图 13-3 所示，单击 OK 按钮完成导入，导入后的效果如图 13-4 所示。

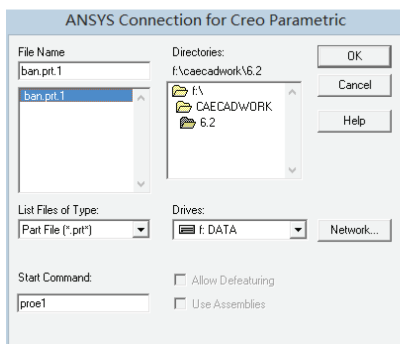


图 13-3 导入 creo（proe）的实体模型界面

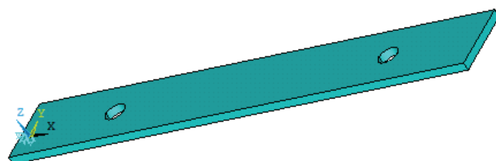


图 13-4 导入实体模型效果

4．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Strutural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，分别将 EX 和 PRXY 项设为 2E6 和 0.28，如图 13-5 所示，单击 OK 按钮。

提示：模型以毫米制对应，应力或弹性模量为 kPa。

5．划分网格

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 菜单命令，勾选 Smart Size 复选框，调节下方滑块到 4，如图 13-6 所示，单击 Mesh 按钮，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮实现模型网格的划分，网格划分完成后的模型如图 13-7 所示。

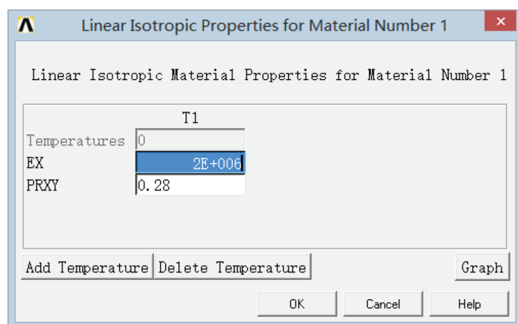


图 13-5 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

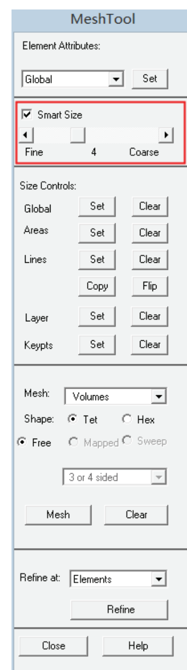


图 13-6 Mesh Tool 对话框



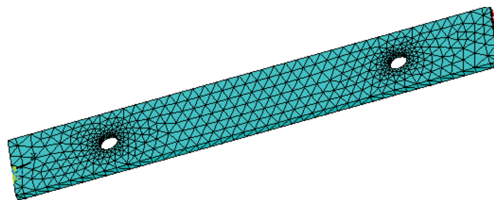


图 13-7 网格效果

6. 定义边界条件

（1）施加约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define lods→Structural→Displacement→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取图 13-11 所示的约束端位置端面，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 ALL DOF 项，如图 13-8 所示，设置该位置全部位移约束为 0，单击 OK 按钮。

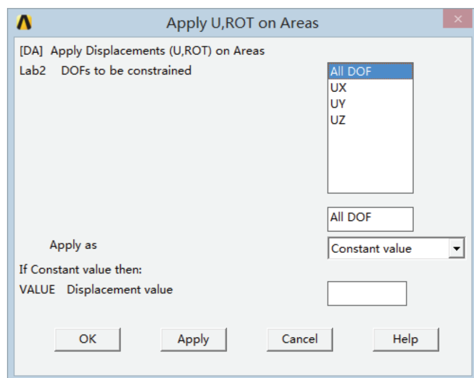


图 13-8 约束设置

（2）施加载荷。首先选择要施加载荷的节点，执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Lines、By Num/Pick 和 From Full，如图 13-9 所示，单击 OK 按钮。弹出线拾取对话框，选择 11 号线，即图 13-11 所示的加载端的一条线，单击 OK 按钮。再次执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选择 Nodes、Attached to、Lines,all 和 From Full，如图 13-10 所示，单击 OK 按钮。



图 13-9 选取线

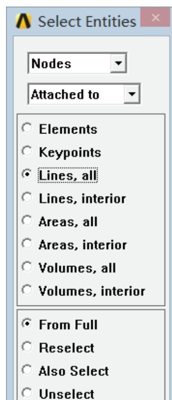


图 13-10 选取节点

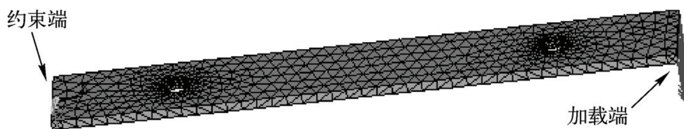


图 13-11 加载位置及效果

施加载荷，执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define lods→Structural→Force/Moment→On node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All，选中已选的全部节点，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，加载方向选择 FX 类型，选择 Constant value，Value 项设为 7e6，如图 13-12 所示，单击 OK 按钮。

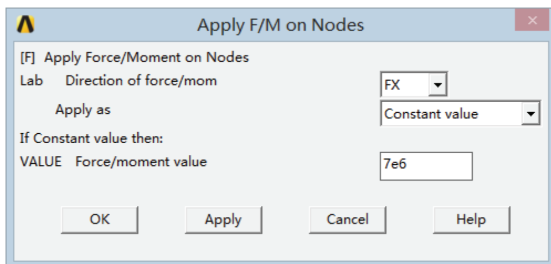


图 13-12 加载力设置

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令选中所有模型。

加载完成后的效果如图 13-11 所示。

注意：为了方便选取，可以执行 Utility Menu→Plot→Volumes 菜单命令显示体或单元或点面等。

7．计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，如图 13-13 所示，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现图 13-14 所示的 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

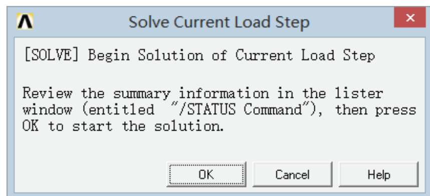


图 13-13 Solve Current Load Step 对话框

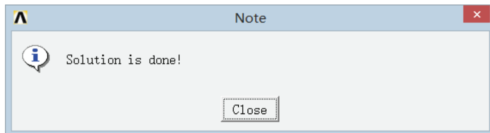


图 13-14 Note 提示框

8．后处理

对于静力分析没有时间历程，选用通用后处理器就可以看应力云图节点的应力查询等获得自己感兴趣的信息。

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，在 INF0 中选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示等效应力云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Stress→von Mises stress，如图 13-15 所示，单击 OK 按钮显示应力分布云图，如图 13-16 所示。

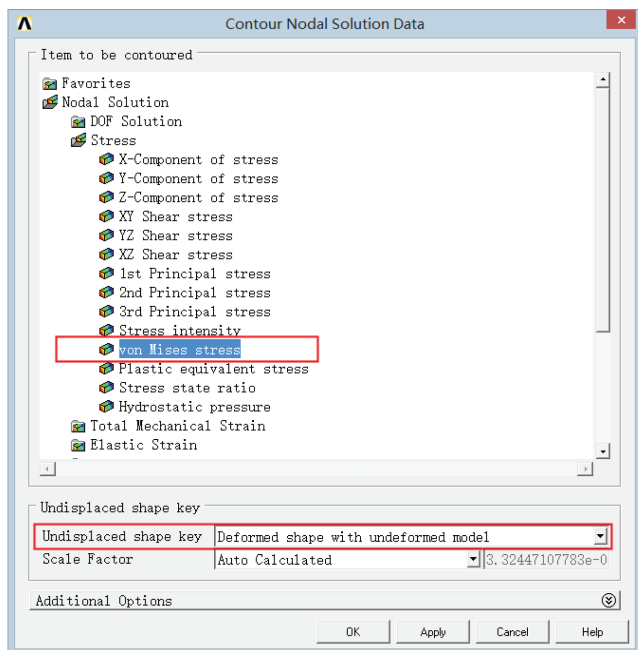


图 13-15　Contour Nodal Solution Data 对话框

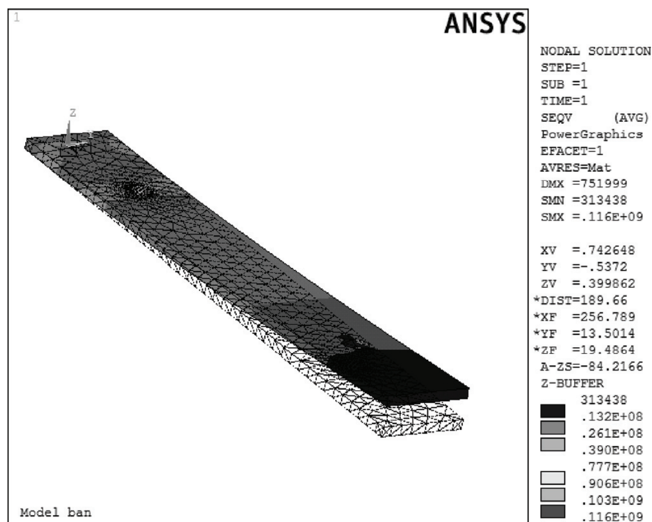


图 13-16　等效应力分布云图

从云图可以看出，最大应力为 116 MPa。在许用应力范围内，出现位置在第一个孔内 MX 可明显看出，最小值 MN 也可以看出。

（3）查看弹性应变的总应变云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中

Elastic strain→von Miseselestic strain，单击 OK 按钮，显示应变分布云图如图 13-17 所示。对于需要查看位移、切应力等的云图点选相应的选项，请读者自行尝试完成。

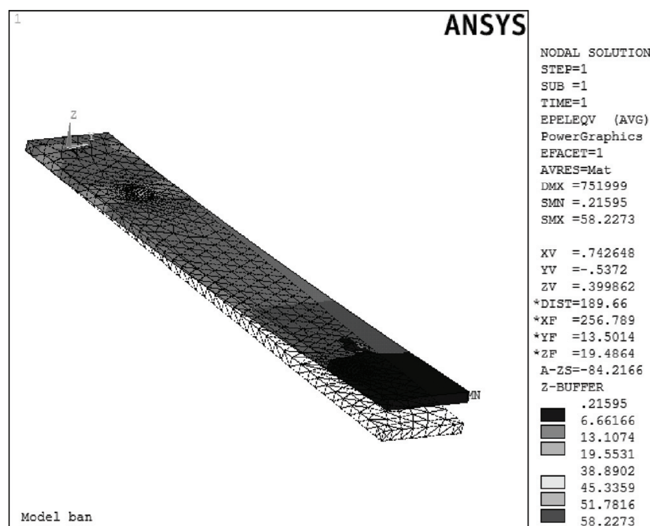


图 13-17　von Miss 等效应变分布云图

9．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

13.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise13-1
/PREP7

ET,1，SOLID186
MP,EX,1,2E6
MP,PRXY,1,0.28
SMRT,4
VMESH,ALL
DA,7,ALL,0
LSEL,S,,,11
NSLL,S,1
/SOLU
SOLVE
/POST1
PLNSOL, EPEL,EQV, 1,1.0
PLNSOL, S,EQV, 1,1.0
SAVE
/QUIT
```

13.3 实例 2——多载荷作用下的阶梯轴分析

阶梯轴是机械传动中的常见部件，受力比较复杂，一般受到弯矩的作用，对于装配有斜齿轮的阶梯轴还受拉力作用。通过传统的材料力学进行精确的计算分析很困难，对于轴上的键槽轴肩等辅助定位和安装的结构都无法考虑，给设计带来了很大不便。因此，通过仿真方法对阶梯轴的受力进行分析有很大的实际意义。

13.3.1 问题描述

如图 13-18 所示，材料为 40Cr 的阶梯轴尺寸，采用两个约束端的简支梁结构支撑，根据材料力学知识可以得出两键槽中间部分受弯扭组合变形，轴承支承左端只受弯曲。

大键槽受径向力 2 kN，小键槽受径向力 3 kN，作用在两端的转矩为 2 kN*M。其中轴的大截面 *D*=40 mm，小截面 *d*=35 mm，请用 ANSYS APLD 求解出应力与位移的分布云图（弹性模量 *E*=210 GPa 泊松比 0.3）。

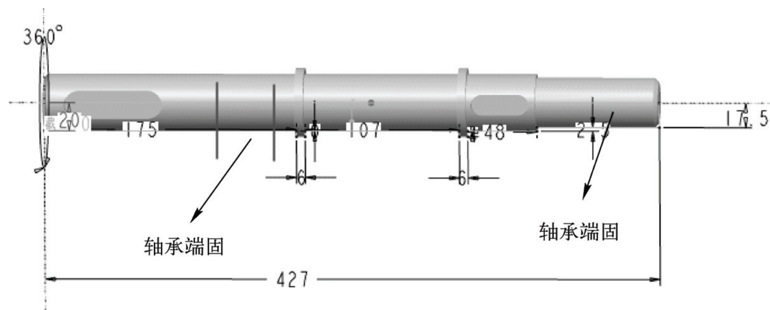


图 13-18 阶梯轴结构

13.3.2 问题分析

处理此问题的关键在于加载扭矩。扭矩从大键槽装配的构件输入，从小键槽输出，中间段受到扭矩作用。在大键槽端面中心创建节点，定义 mass21，CERIG 命令跟其他受力节点耦合，形成刚性区，然后直接将扭矩加到这个节点上。这个方法适用于小变形。

13.3.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise13-2”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Tsypes 对话框，选择 Structural Solid 和 Brick 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，单击 OK 按钮。

继续单击 Add 按钮，在 Library of Element Types 对话框中选择 Structural Mass 和 3D

mass 21，单击 OK 按钮。单元定义完成后 Element Types 项如图 13-19 所示。

3．导入模型文件

执行 File→import→Creo-Parame 菜单命令，在弹出的对话框中选择具体位置。单击 OK 按钮完成导入，导入后的效果如图 13-20 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

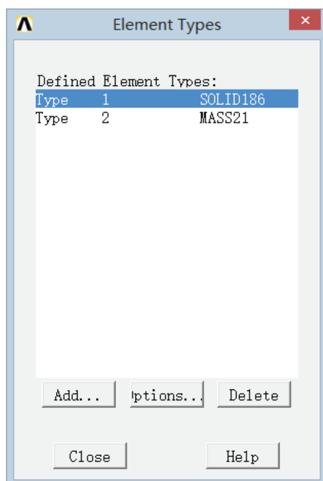


图 13-19 Element Types 对话框

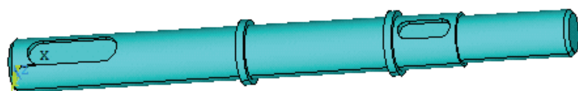


图 13-20 模型导入效果

4．定义质点质量

执行 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 菜单命令，弹出实常数定义对话框，单击 Add 按钮，弹出单元类型选择对话框，选中 Type 2 MASS21 项，如图 13-21 所示，单击 OK 按钮，弹出实常数设置对话框，设置 MASSX 为 1e-5，如图 13-22 所示，单击 OK 按钮，再单击 Close 按钮。

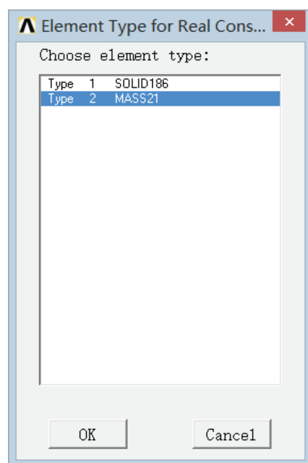


图 13-21 选取实常数单元类型

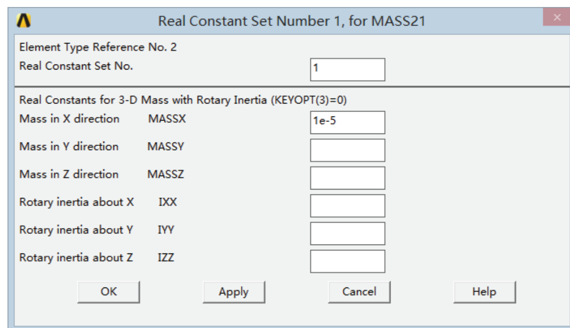


图 13-22 设置实常数

5．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Strutural→Linear→

Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入 2.1e8 和 0.3，单击 OK 按钮。

6．修改模型以定义约束

分别将工作平面在 X 正方向移动 160 mm 和 120 mm，切出 40 mm 宽的体模拟轴承的约束。执行 WorkPlane→Offset WP to→XYZ Location +菜单命令，弹出 Offset WP to XYZ Location 对话框，在文本框中输入“160,0,0”，如图 13-23 所示，单击 OK 按钮实现工作平面的移动。

使用工作平面切割体。执行 Main Menu→Modeling→Operate→Divide→Volu by WrkPlane 菜单命令，弹出体选取对话框，选中体，单击 OK 按钮，实现工作平面对体的切割。

同样按照此法操作切出 X=120、Y=0、Z=0 处的体。执行 WorkPlane→Offset WP to→XYZ Location +菜单命令，弹出 Offset WP to XYZ Location 对话框，在文本框中输入 120,0,0，单击 OK 按钮，实现工作平面的移动。执行 Main Menu→Modeling→Operate→Divide→Volu by WrkPlane 菜单命令，弹出体选取对话框，选中体，单击 OK 按钮，实现工作平面对体的切割。

切割完成后，其效果如图 13-24 所示。

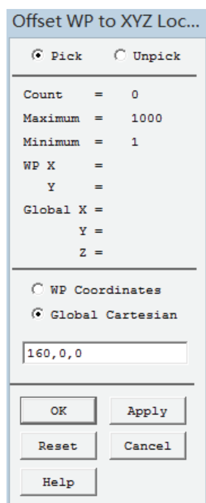


图 13-23　Offset WP to XYZ Location 对话框

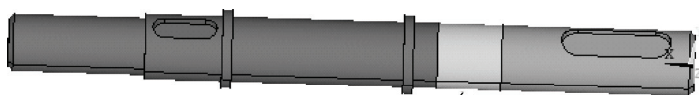


图 13-24　模拟轴承约束切出的体效果

注意：工作平面指的是 XY 平面。

注意：如果旋转工作平面 WPROTA，THXY，THYZ，THZX！分别对应 Z,X,Y 轴角度。

```
VSBW，1    ！由工作平面切出体，1 代表要切的体的代号
```

7．划分网格

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 菜单命令，勾选 Smart Size 复选框，调动下方滑块到 4，单击 Mesh 按钮，弹出体选取对话框，单击 Pick All 按钮完成网格划分，最终的网格如图 13-25 所示。

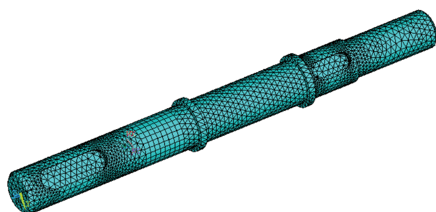


图 13-25 自动划分网格效果

8．建立刚性区域

（1）创建加载节点。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Node→In Actice CS 菜单命令，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，将 NODE 项设为 70000，X、Y、Z 项均设为 0，如图 13-26 所示，单击 OK 按钮。

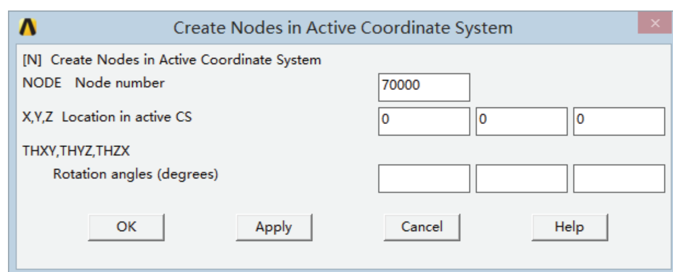


图 13-26 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

（2）定义单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Element→Elem Attributes 菜单命令，弹出 Element Attributes 对话框，Element type number 为 2 Mass21，Real constant set number 为 1，如图 13-27 所示，单击 OK 按钮。

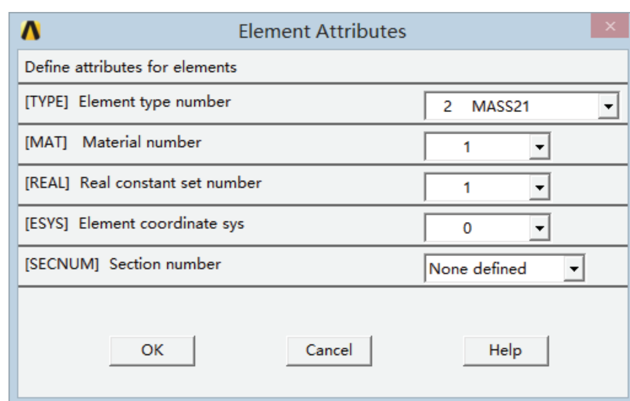


图 13-27 Element Attributes 对话框

（3）创建质点单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Element→Auto Numbered→Thru Node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，在文本框中输入“70000”，单击 OK 按钮。

（4）选取端面节点。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置 Node、By Location 和 Xcoordinates，MIN 和 MAX 项均设为 0，单击 OK 按钮，选中 x=0 的所有节点，即端面节点。

（5）生成刚性区。执行 Main Menu→Preprocessor→Couping/Ceqn→Rigid Region 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“70000”，单击 Apply 按钮。再在节点拾取对话框中单击 Pick All 按钮，弹出 Constraint Equation for Rigid Region 对话框，Ldof 项选择“Rotations R XYZ”，如图 13-28 所示，单击 OK 按钮，端面上节点与质量节点的耦合效果如图 13-29 所示。

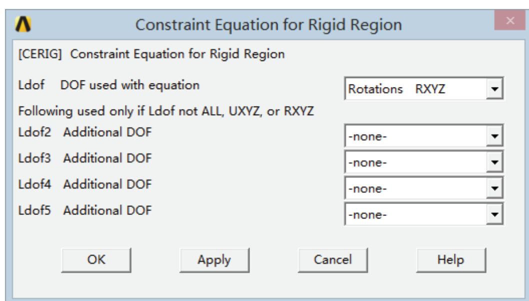


图 13-28 Constraint Equation for Rigid Region 对话框

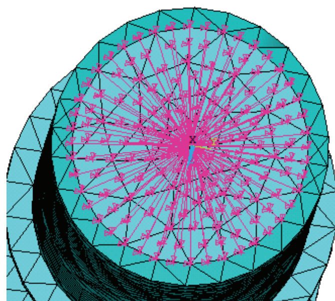


图 13-29 端面上的节点与质量节点

执行 Utility Menu：Select→Everything，选中所有模型。

9．定义边界条件

（1）模拟轴承施加约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displaceme→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，依次拾取图 13-30 所示的施加 UY, UZ 的 4 个面，即 3,14,19,39 四个面，也可以直接在面拾取对话框中输入“3,14,19,39”，单击 OK 按钮，选中 4 个面，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选择 UY 项，如图 13-31 所示，单击 Apply 按钮；又弹出面拾取对话框，再次选取 3,14,19,39 四个面，单击 OK 按钮，在弹出的 Apply U,ROT on Areas 对话框中选择 UZ 项，单击 OK 按钮。

（2）施加固定约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define lods→Structural→Displaceme→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取图 13-30 所示的端面，即 2 号面，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 All DOF 项，单击 OK 按钮。

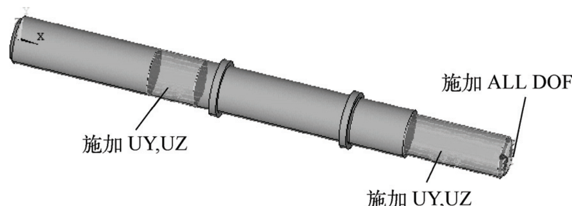


图 13-30 载荷施加位置示意图

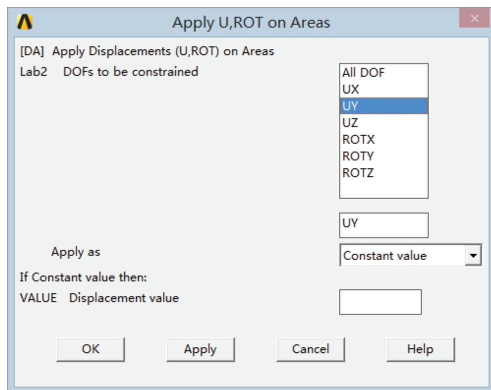


图 13-31 Apply U,ROT on Areas 对话框

（3）施加大键槽径向载荷。首先选中大键槽上的所有节点。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置 Area、By Num/Pick 和 From Full，单击 OK 按钮，弹出面拾取对话框，拾取大键槽上的面，即 20 号面，单击 OK 按钮，选中如图 13-32 所示的面；再次执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置 Nodes, Attached to, Areas,all 和 From Full，单击 OK 按钮。执行 Plot→Nodes 或 Plot→Areas 菜单命令查看是否选对，效果如图 13-32 所示。



图 13-32　选取面上的点效果

在已选节点上施加径向载荷，执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Force/Moment→On nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，选中 FZ，VALUE 项设为 2e6，单击 OK 按钮。

（4）施加小键槽径向载荷。采用同大键槽载荷施加同样的方式，首先选中小键槽所有节点。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置 Area、By Num/Pick 和 From Full，单击 OK 按钮，弹出面拾取对话框，拾取大键槽上的面，即 21 号面，单击 OK 按钮选中，再次执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置 Nodes, Attached to, Areas,all 和 From Full，单击 OK 按钮。

在已选节点上施加径向载荷，执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Force/Moment→On nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，选中 FZ，VALUE 项设为 2e6，如图 13-33 所示，单击 OK 按钮。

（5）施加扭矩。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Force/Moment→On node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“70000”，单击 OK 按钮。弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，选中 MX，VALUE 项设为 2e6，如图 13-34 所示，单击 OK 按钮。

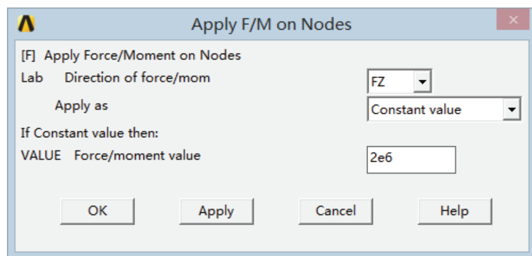


图 13-33　设置小键槽径向载荷加载力

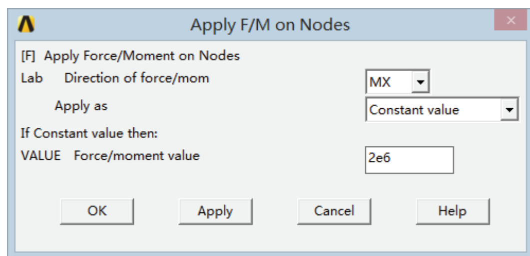


图 13-34　添加转矩

10．计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

11．进行后处理

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示等效应力云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Stress→von Mises stress，单击 OK 按钮，显示应力分布云图如图 13-35 所示。

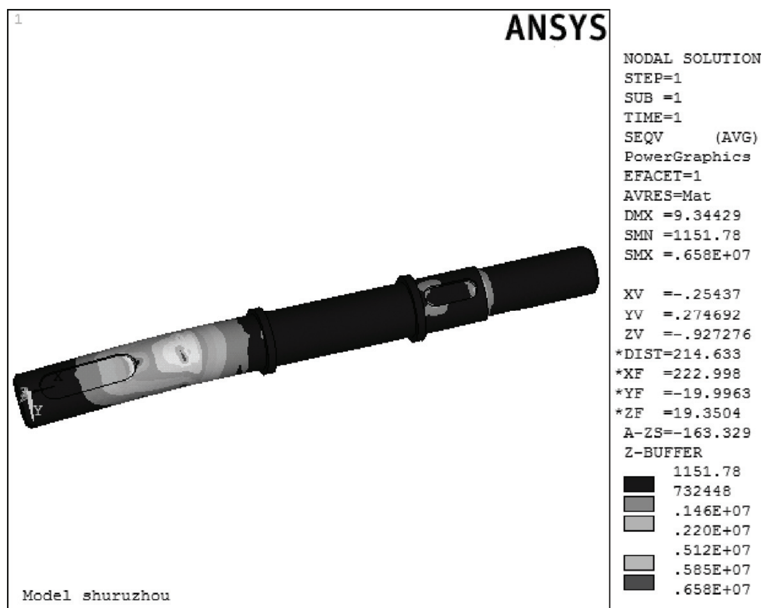


图 13-35 等效应力云图

由图可看出最大应力在大键槽一侧轴承约束处，如图中深色区域所示。符合载荷作用下的阶梯轴的其他结果（如应变、转角、切应力等）请读者自行尝试，对于结果的判定根据材料力学内容简要估计判定。

12．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

13.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise13-1
/PREP7

ET,1，SOLID186
```

```
ET,2,MASS21
R,1,1E5, , , , , ,
MP,EX,1,2.1E8
MP,PRXY,1,0.3
WPAVE,160,0,0
VSBW,ALL
WPAVE,120,0,0
VSBW,ALL
SMRT,4
VMESH,ALL
N,70000,0,0,0
TYPE,2
REAL,1
E,70000
ESEL,S,LOC,X,0
CERIG,70000,ALL,RXYZ
ASEL,S,,,3
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,19
ASEL,A,,,39
DA,ALL,UY,
DA,ALL,UZ,
ASEL,S,,,2
DA,ALL,ALL,
ASEL,S,,,20
NSLA,S,1
F,ALL,FZ,2e6
ASEL,S,,,21
NSLA,S,1
F,ALL,FZ,3e6
F,70000,MX,2e6
/SOLU
SOLVE
/POST1
PLNSOL, S,EQV, 1,1.0
SAVE
/QUIT
```

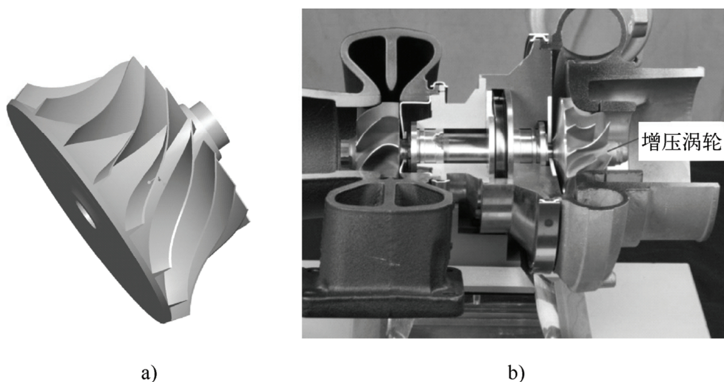
13.4 实例 3——惯性载荷作用下的叶轮受力分析

径流式叶轮的应用很广泛，从飞机用的大型燃气轮机到流体泵等流体机械。其中，汽车上应用的废气涡轮增压就是应用离心压气机和向心透平机机组成，中间用一颗轴连接。工作原理较简单工艺性要求高，这主要是由于工作特性造成的。其一，工作转速从几万到十几万转/分，在叶片根部处产生很强的离心力，对于运动副的摩擦产热很严重，对于透平机是由燃烧后的废气驱动温度从 300℃到 700℃，增加了热负荷并且是间断排气造成冲击，因此很

有必要对其惯性载荷造成的应力进行仿真分析。

13.4.1 问题描述

图 13-36 所示为车用涡轮增压系统中的压气机三维实体和实物图片，主要受离心载荷作用，转速为 50000 转/分（w=5236 rad/s），材料为 35CrMoVA，泊松比为 0.3，弹性模量为 210 GPa，屈服强度为 600 MPa，抗拉强度为 780 MPa，密度为 7850 kg/m^3。使用 ANSYS 确定其是否可以安全使用，并绘制等效应力云图。



a) b)

图 13-36 车用涡轮 CAD 模型与实体图

a) 三维模型 b) 实体模型

13.4.2 问题分析

本实例的关键在于惯性载荷的施加，惯性存在于整个模型，查看模型由一定的转速改变为停止状态的应力应变分布。定义中心面静止，对整个模型施加 5236 rad/s 的转速载荷，采用 20 节点 SOLID186 单元进行分析，采用国际单位制。

13.4.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise13-3”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Solid 和 Brick 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，单击 OK 按钮。

3．导入模型文件

执行 File→import→Creo-Parame 菜单命令，在弹出的对话框中选择具体位置。单击 OK 按钮完成导入，导入后的效果如图 13-37 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

4．定义材料属性

定义弹性模量和泊松比，执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models 菜单命令，弹出材料属性定义对话框，选择 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜

单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，分别输入“210e9”和“0.3”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，将 DENS 项设为 7850，如图 13-38 所示，单击 OK 按钮。

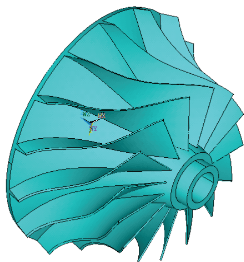


图 13-37　模型导入效果

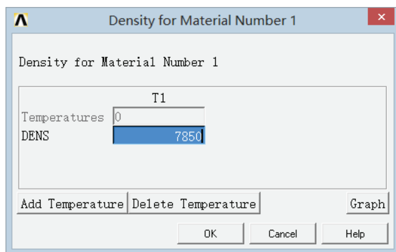


图 13-38　设置密度

5. 划分网格

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Tool 菜单命令，勾选 Smart Size（自动划分尺寸）调动下方滑块到 6，单击 Mesh 按钮，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮，网格划分后的网格效果如图 13-39 所示。

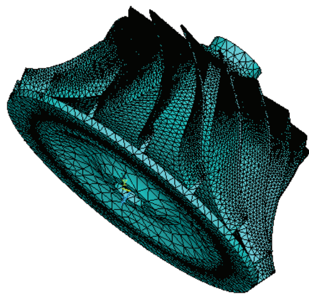


图 13-39　划分网格后效果图

6. 查看有限元模型的参数

查看如单元数量、节点数量，几何模型的关键点、线、面等参数。执行 Utility Menu→List→Status→Global Status 菜单命令，弹出/STAT Command 信息列表，如图 13-40 所示，查看感兴趣的部分，也有助于控制求解规模。

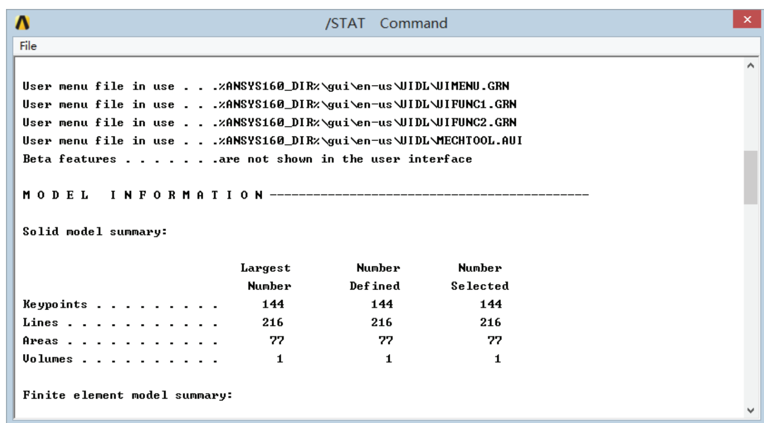


图 13-40　/STAT Command 信息列表

7. 定义边界条件

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，输入“76,28”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选择 All DOF 项，如图 13-41 所示，单击 OK 按钮。



8．施加角速度载荷

首先激活柱坐标，执行 Main Menu→Workplane→changeActiveCS to→global cylindrical Y 菜单命令，激活 Y 方向柱坐标。

施加角速度载荷，执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Inertia→Angular Veloc→Global 菜单命令，弹出 Apply Angular Velocity 对话框，将 OMEGZ 项设为 5236，如图 13-42 所示，单击 OK 按钮。

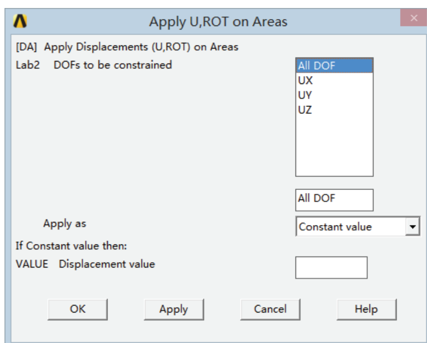


图 13-41 Apply U,ROT on Areas 对话框

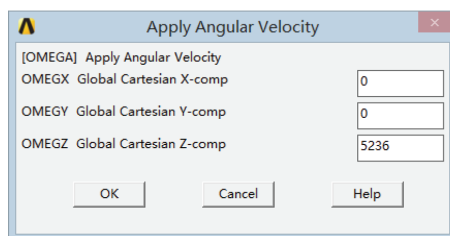


图 13-42 设置施加角速度

注意：惯性载荷以加速度、角速度和角加速度等方式施加在模型上。惯性载荷只在模型有质量的时候起作用，模型的质量一般通过对材料定义 Density 获得，也可以通过提供质量单元给出质量，以定义材料的密度更常用，同时需要注意单位的统一。

9．计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

10．进行后处理

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示等效应力云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Stress→von Mises stress，单击 OK 按钮，显示应力分布云图如图 13-43 所示。

由应力分布云图可以看出最大应力出现在单个叶片上方处，这也很好地解释了叶片上方的径向长度最长，产生的离心力也是最大的。

（3）显示位移分布云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 DOF Solution→Displacement vector sum，单击 OK 按钮，显示位移分布云图如图 13-44 所示。

注意：对于实体单元以上云图推荐用 FULL 模式显示 ANSYS Toolbar POWRGRPH，单击 ON 或 OFF 切换显示模式，系统默认 POWER 模式。

全图形（FullGraphics）的优点如下：

■ 显示参数少，这意味着在用户间有更好的可移植性。

■ 显示结果总是和打印结果一致。

■ 结果总是和得到的结果文件一致（没子网格数据插入）。

一般来讲，增强图形（PowerGraphics）会比全图形产生较大（或较保守）的值：

（1）表面总会产生较大的应力，增强图形没有对表面以下的单元结果进行平均。

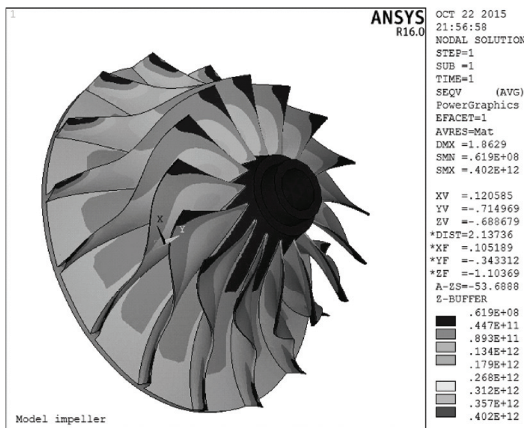


图 13-43 等效应力云图

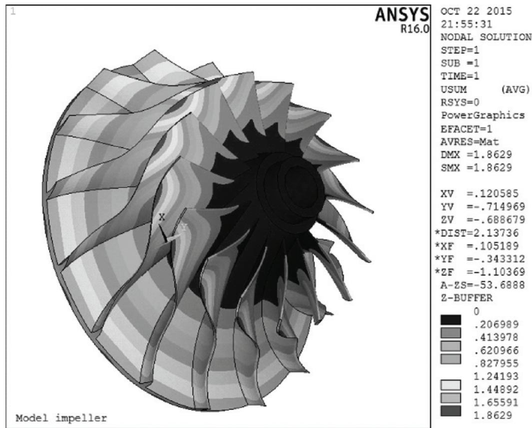


图 13-44 位移云图

（2）在不连续处不进行平均处理，会得到较为真实的图形显示（因为实际上在不连续处的应力和应变是存在差异的）。

对于承载能力计算来说，选择哪种图形显示模式也可能取决于哪种结果被用来和试验数据进行对比。

只需要在工具条中单击 POWRGRPH 按钮，在弹出的对话框中选择 OFF 就可以关闭增强图形显示模式。也可以用命令 ERNORM,OFF 关闭增强图形显示模式。这样列表和应力云图中的最大值就一样了。

11．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

13.4.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise13-3
/PREP7

ET,1,SOLID186
MP,EX,1,210E9
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7850
SMRT,6
VMESH,ALL
/STAT,GLOBAL
```

```
ASEL,S,,,76
ASEL,A,,,28
DA,ALL,ALL,
CSYS,5
OMEGA,0,0,5236,
/SOLU
SOLVE
/POST1
PLNSOL, S,EQV, 1,1.0
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
SAVE
/QUIT
```

13.5 实例 4——静载荷作用下的简支梁

13.5.1 问题描述

长 3 m 的工字型梁两端铰接中间 1.5 m 位置处受到 6 kN 的载荷作用，材料弹性模量 E 为 200e9，泊松比为 0.28，密度为 7850 kg/m^3。工字梁截面和受力截图如图 13-45 所示。求其最大挠度并获得挠曲线和最大应力单元解。

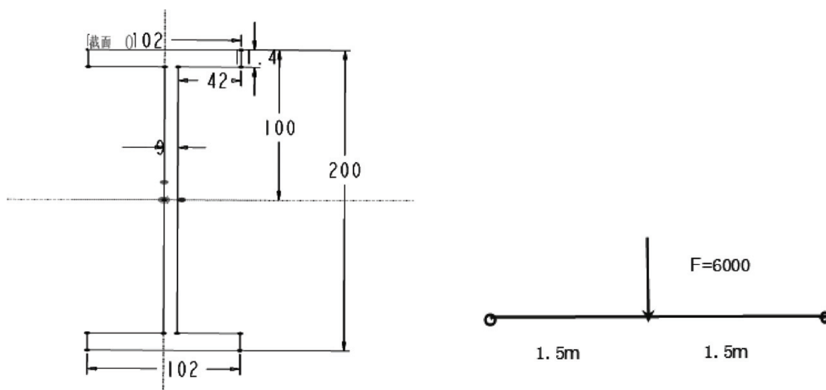


图 13-45　模型截面及受力简图

13.5.2 问题分析

该问题较简单，且几何状况不复杂，截面也比较规则，可以在 ANSYS 中对应的梁单元以及截面模型库中进行选择，所以解决本问题可以直接在 ANSYS 中建立几何模型并求解。

13.5.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise13-4”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Beam 和 3 node 189，3 节点 BEAM189 单元，如图 13-46 所示，单击 OK 按钮。

注意：Beam188、Beam189 单元为梁单元中功能最全面的单元，但在大规模问题中，计算可能会慢些，实际问题中应根据具体情况适当选取。

3．定义材料属性

定义弹性模量和泊松比，执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models 菜单命令，弹出材料属性定义对话框，选择 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“210e9”和“0.3”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“7850”，单击 OK 按钮。

4．创建几何模型

（1）设定梁的截面尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Beam→Common Sections 菜单命令，弹出 Beam Tool 设置对话框，Sub-Type 项（即截面形状下拉列表框）选择工字钢形状，W1、W2、W3、t1、t2、t3 项分别设为 0.102、0.102、0.2、0.0114、0.0114、0.009，如图 13-47 所示。

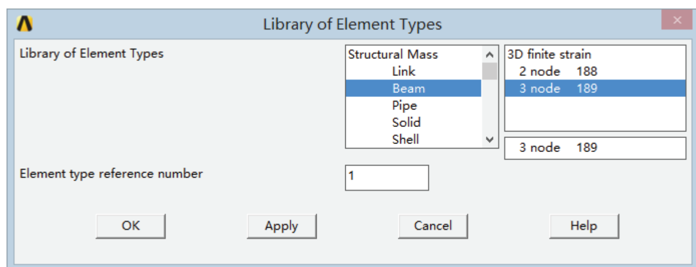


图 13-46 Library of Element Types 对话框

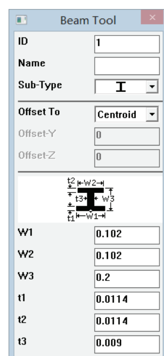


图 13-47 Beam Tool 设置对话框

（2）定义关键点，通过坐标创建 3 个关键点。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 菜单命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，NPT 项设为编号 1，输入坐标值 0,0,0，如图 13-48 所示，单击 Apply 按钮，再分别输入 1.5,0,0 和 3,0,0，完成后单击 OK 按钮退出。创建的关键点如图 13-49 所示。

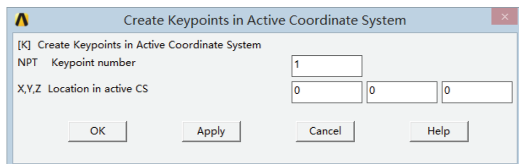


图 13-48 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框



图 13-49 关键点示意图

（3）通过关键点创建直线。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Lines→Straight line 菜单命令，弹出节点拾取对话框，依次拾取 1 号和 2 号关键点，单击 Apply 按钮，再依次拾取 2 号和 3 号关键点，单击 OK 按钮，建立线如图 13-50 所示。

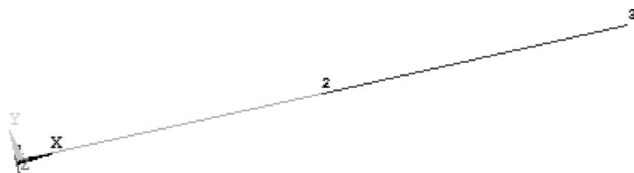


图 13-50　创建完线的效果

5．划分网格

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 0.05，如图 13-51 所示，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，单击 Pick All 按钮拾取所有线，完成线网格的划分。

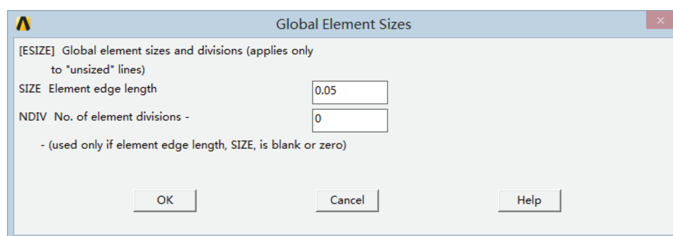


图 13-51　Global Element Sizes 对话框

观看网格的效果，执行 PlotCtrls→Style→Size and Shape 菜单命令，弹出 Size and Shape 对话框，/ESHAPE 项选中 On，如图 13-52 所示，单击 OK 按钮，显示网格划分效果，如图 13-53 所示。

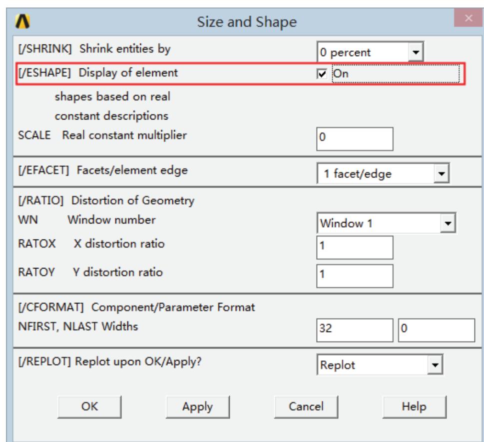


图 13-52　Size and Shape 对话框

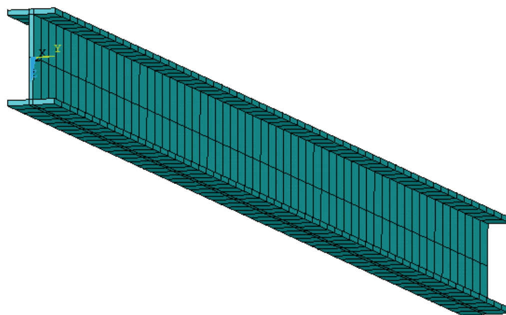


图 13-53　网格划分效果图

6．定义边界条件

（1）定义约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→

Displacement→On Keypoints 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，输入 1,3，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on KPs 对话框，选中 All DOF 项，如图 13-54 所示，单击 OK 按钮。

（2）施加载荷，在关键点 2 施加 Y 向 F=-6000 N 的力。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Force/Moment→On Keypotins 菜单命令，弹出 Apply F/M on KPs 对话框，Lab 项选中 FY 项，输入“-6000”，如图 13-55 所示，单击 OK 按钮。

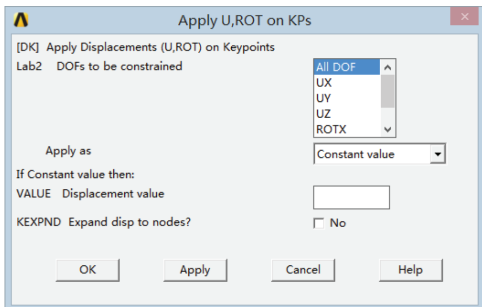


图 13-54 Apply U,ROT on KPs 对话框

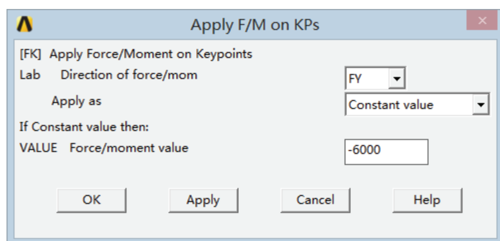


图 13-55 Apply F/M on KPs 对话框

7. 计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

8. 进行后处理

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）读取计算结果。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Read Result→First Result 菜单命令。

（3）显示挠曲线。执行 PlotCtrls→Style→Size and Shape 菜单命令，弹出 Size and Shape 对话框，/ESHAPE 项选中 Off，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Plot→Results→Deformed Shape 菜单命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选中 Def + undeformed 单选按钮，如图 13-56 所示，单击 OK 按钮，显示挠曲线变形线，如图 13-57 所示。

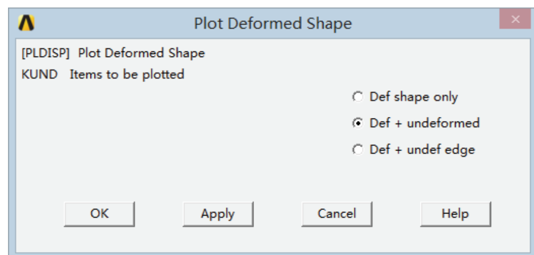


图 13-56 Plot Deformed Shape 对话框

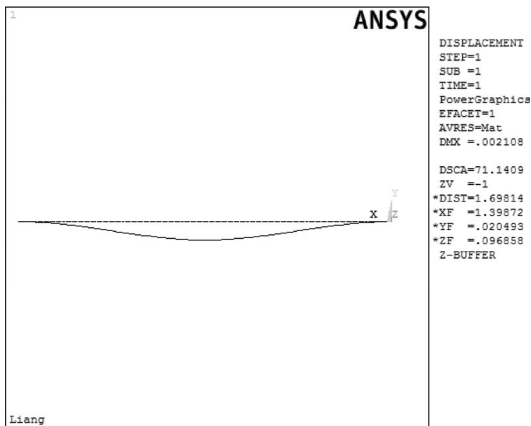


图 13-57 挠曲线变形线

（4）显示应力云图。显示梁单元的应力等值线图，需要打开实际形状显示功能。执行 Utility Menu→PlotCtrl-→Style-Size and Shape 菜单命令，/ESHAPE 项选择 On 后单击 OK 按钮。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Stress→von Mises stress，单击 OK 按钮，显示应力分布云图如图 13-58 所示。

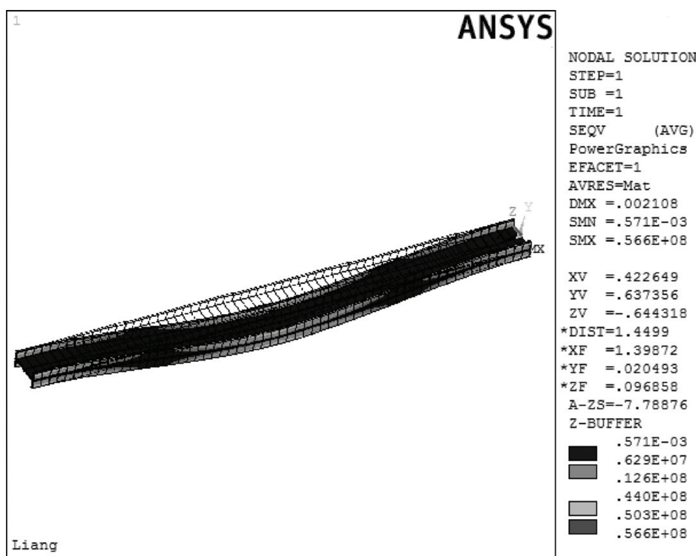


图 13-58 应力分布云图

（5）列表显示单元数值解。获取应力最大节点的编号有很多种方法，下面介绍一种常用的。首先执行 Main Menu→General Postproc→Query Results→SubgridSolu 菜单命令，弹出 Query Subgrid Solution Data 对话框，依次选中 Stress 和 Von Mises SEQV，如图 13-59 所示，单击 OK 按钮。弹出 Query Subgrid Results 对话框，单击 Max 按钮，最大应力位置坐标等信息出现在中间第 1 号单元上，如图 13-60 所示。

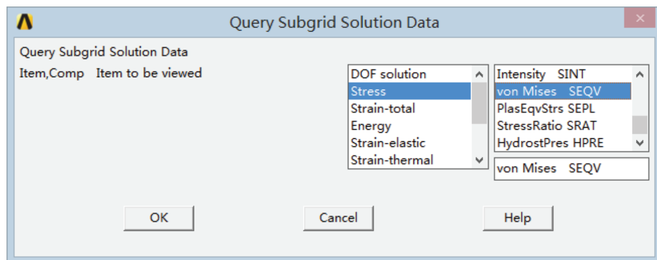


图 13-59 Query Subgrid Solution Data 对话框

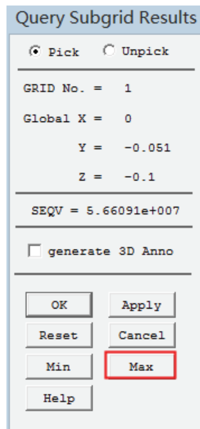


图 13-60 Query Subgrid Results 对话框

列表显示单元解。Beam189 每个单元有 3 个节点，对应每个节点都有一组解。执行 Main Menu→General Postproc→List Results 菜单命令，弹出 List Element Solution 对话框，依次选中 Element Solution→von Mises stress 项，如图 13-61 所示，单击 OK 按钮，显示单元节点解，其中最大值如图 13-62 所示。上图中的 S1、S2、S3 分别代表即 SXX 为轴向正应力，SXY、SXZ 为截面剪应力；SEQV 代表等效应力，就是第四强度理论的值。

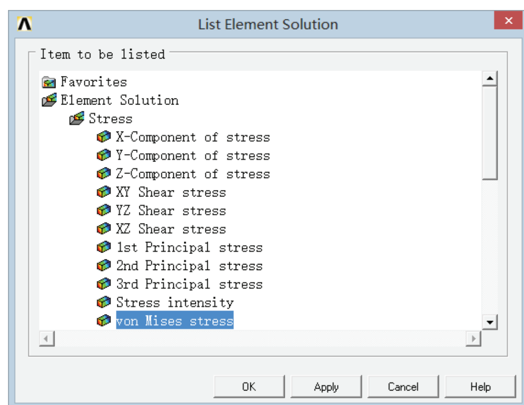


图 13-61　List Element Solution 对话框

ELEMENT = 1 SECTION ID = 1

ELEMENT NODE = 1

等效应力

SEC NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQU
1	0.0000	0.0000	-0.56609E+08	0.56609E+08	0.56609E+08
3	0.0000	0.0000	-0.49949E+07	0.49949E+07	0.49949E+07
17	0.0000	0.0000	-0.49949E+07	0.49949E+07	0.49949E+07
15	0.0000	0.0000	-0.56609E+08	0.56609E+08	0.56609E+08
5	0.49949E+07	0.0000	0.0000	0.49949E+07	0.49949E+07
19	0.49949E+07	0.0000	0.0000	0.49949E+07	0.49949E+07
7	0.56609E+08	0.0000	0.0000	0.56609E+08	0.56609E+08
21	0.56609E+08	0.0000	0.0000	0.56609E+08	0.56609E+08
27	0.49949E+07	0.0000	0.0000	0.49949E+07	0.49949E+07
25	0.0000	0.0000	-0.49949E+07	0.49949E+07	0.49949E+07
35	0.49949E+07	0.0000	0.0000	0.49949E+07	0.49949E+07
33	0.0000	0.0000	-0.49949E+07	0.49949E+07	0.49949E+07
31	0.0000	0.0000	-0.56609E+08	0.56609E+08	0.56609E+08
47	0.0000	0.0000	-0.49949E+07	0.49949E+07	0.49949E+07
45	0.0000	0.0000	-0.56609E+08	0.56609E+08	0.56609E+08
49	0.49949E+07	0.0000	0.0000	0.49949E+07	0.49949E+07
37	0.56609E+08	0.0000	0.0000	0.56609E+08	0.56609E+08
51	0.56609E+08	0.0000	0.0000	0.56609E+08	0.56609E+08
Max=	0.56609E+08	0.0000	0.0000	0.56609E+08	0.56609E+08
Min=	0.0000	0.0000	-0.56609E+08	0.49949E+07	0.49949E+07

56MPa

图 13-62　30 号单元的第二个节点解

9．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

13.5.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise13-4
/PREP7
ET,1,BEAM189
```

```
MP,EX,1,210E9
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7850
SECTYPE,    1, BEAM, I, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.102,0.102,0.2,0.0114,0.0114,0.009,0,0,0,0,0,0
K,1,0,0,0,
K,2,1.5,0,0,
K,3,3.0,0,0,
LSTR,        1,        2
LSTR,        2,        3
ESIZE,0.05,0,
LMESH,ALL
/ESHAPE,1.0
KSEL,S,,,1,3,2
DK,ALL, , , ,0,ALL, , , , , ,
FK,2,Fz,-6000
/SOLU
SOLVE
/POST1
SET,FIRST
PLDISP,1
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 1,1.0
PRESOL,S,PRIN
SAVE
/QUIT
```

13.6 本章小结

本章主要介绍了静力分析中的线性分析，详细讲解了有限元线性分析的理论知识，并对 4 个在不同性质载荷作用下的响应情况的计算实例进行详细完整的讲解，使读者能够进行处理线性静力分析问题。



第 14 章 模 态 分 析

本章主要讲解模态分析的理论基础和主要操作步骤，然后以实例的形式详细讲解模态分析的操作流程以及分析过程中需要注意的事项。

学习目标：

（1）了解模态分析的原理;

（2）掌握模态分析的操作流程;

（3）掌握处理相关实际问题的方法。

14.1 结构动力学分析概述

结构动力学分析不同于静力分析，常用来确定时变载荷对整个结构或部件的影响，同时还要考虑阻尼及惯性效应的作用效果。

动力学分析功能包括模态及复特征值分析、频率及瞬态响应分析、噪声学分析、随机响应分析、响应及冲击谱分析等。针对中小或超大型问题有不同的解题规模，如在处理大型结构动力学问题时，如不利用特征缩减技术将会使解题效率大大降低。

动力学分析是用来确定质量（惯性）和阻尼起重要作用的结构和构件动力学特性的技术，主要目的有以下两点：

- 确定结构振动特征，即固有频率和阵型。
- 分析结构的动力响应特性、响应的变化规律等。利用或减轻这种响应依据这一特性。

动力学分析的理论基础为有限元系统方程：

$$\boldsymbol{M}\ddot{U} + \boldsymbol{C}\dot{U} + \boldsymbol{K}U = F(t) \qquad (14\text{-}1)$$

其中 $\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵；$\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵；$\boldsymbol{C}$ 为整体阻尼矩阵。

可以看出，式（14-1）就是一个二阶振动系统方程，所研究问题只是其中的相应相变化。如瞬态动力学分析只是 $F(t)$随时间变化的函数。

提示：随时间变化的常见载荷有以下 4 种:

- 交变力（旋转机构）;
- 冲击力（爆炸、冲击）;
- 随机力（地震）;
- 瞬态力（发动机活塞顶部受到的燃气推力）。

动力学分析重点研究以下 4 种问题：

- 模态分析。当外力 $F(t)$=0 时，结构自由振动由式（14-1）确定振动固有频率和振型，是其他动力学分析的基础。

■ 瞬态动力学分析。当 $F(t)$为随时间确定的函数，确定结构的瞬态响应。

■ 谐响应分析。当 $F(t)$为简谐函数时，角频率在一定范围内变化，结构做简谐振动，确定激振对结构的响应分析防止共振的产生。

■ 谱分析。$F(t)$不确定，靠统计学规律研究结构在任意时间变化载荷和随机载荷下的结构响应。

读者对所分析问题了解就可以，ANSYS 程序已经高度集成化，掌握输入的每个参数或数据所对应的求解意义能够更好地处理实际问题。如果是机械模仿操作步骤，解决问题变化或是出现错误就不能彻底解决问题了。

14.2 模态分析简介及操作步骤

振动模态是弹性结构固有的、整体的特性。通过模态分析搞清楚了某结构在某一易受影响的频率范围内的各阶主要模态特性，就可以预言该结构在此频段内，在外部或内部各种振源作用下产生的实际振动响应情况。因此，模态分析是结构动态设计及设备故障诊断的重要方法。

机器、建筑物、航天航空飞行器、船舶、汽车等实际振动千姿百态、瞬息变化。模态分析提供了一条研究各类振动特性的有效途径。首先，将结构物在静止状态下进行人为激振，通过测量激振力与响应并进行双通道快速傅里叶变换（FFT）分析，得到任意两点之间的机械导纳函数（传递函数）。

通过用模态分析理论对试验导纳函数曲线拟合，识别出结构物的模态参数，从而建立起结构物的模态模型。在已知各种载荷时间历程的情况下，就可以根据模态叠加原理预言结构物实际振动的响应历程或响应谱。

14.2.1 模态分析原理

对于无阻尼自由振动情况，动力学基本方程中的阻尼项和外加激振项为零，即

$$MU^{''}(t)+KU(t)=0 \tag{14-2}$$

任何弹性体的自由振动都可以分解为一系列简谐振动的叠加。式（14-2）的简谐振动解：

$$U(t)=U_0\sin\omega t \tag{14-3}$$

式中，ω 为固有频率；U_0 为各节点振动值，也称为振型。

将式（14-3）代入到基本方程（14-2）中得到

$$(K-\omega^2 M)U_0=0 \tag{14-4}$$

由于自由振动，结构中各节点的振幅 U_0 不全为 0，故括号内矩阵对应的行列式的值必须为零。即

$$|K-\omega^2 M|=0 \tag{14-5}$$

由于结构刚度矩阵 $\boldsymbol{K}$ 和质量矩阵 $\boldsymbol{M}$ 均为（节点自由度数量）n 阶的方阵，所以式（14-5）

是关于 ω^2 的 n 次方程，由此可求得 n 的固有频率。ω^2 称为广义特征值。对应每一个固有频率，由式（14-3）可以确定一组节点振幅 U_0，此振幅称为广义特征向量或结构的主阵型，其中最小的特征值对应的主阵型称为基本阵型。

由上述分析可知，动力学问题中的固有频率和主振型的计算可以归纳为求特征方程的特征值和特征向量问题。

（1）固有频率的特点

■ 结构的固有频率都是正实数。
■ 没有刚体运动的结构固有频率都大于零。有刚体运动的结构，其固有频率可能出现的零值个数与刚体自由度数对应。

（2）主振型的特点

■ 结构固有频率无重频时，各个主振型有正交性；有重频时，不具有正交性。
■ 结构固有频率有 0 时，零频对应的主振型为结构的刚体位移。
■ 结构频率与坐标选择无关。

ANSYS 的模态分析可以对有预应力的结构和循环对称结构进行模态分析。前者有旋转的叶轮涡轮等模态分析，后者则允许建立在一部分循环对称结构的模型来完成对整个结构的模态分析。

ANSYS 产品系列中的模态分析全都是线性的，任何非线性的选项，如材料非线性、非线性单元接触以及蠕变等都会被其忽略。

ANSYS 提供了 7 种模态提取法，分别是子空间法、Block Lanczos 法、Power Dunamics 法、缩减法、非对称法、阻尼法和 QR 阻尼法。其中常用的是 Block Lanczos 法、子空间法和缩减法 3 种。

表 14-1 中详细比较了以下 4 种方法。

表 14-1 求解法对照表

模态提取法	适 用 范 围	内 存 要 求	存 贮 要 求
Block Lanczos 法	该方法默认提取方法，用于提取大模型的多阶模态（40 阶以上），建议在模型中包含形状较差的实体和壳单元时采用此法。最适合于由壳或壳与实体组成的模型，速度快，但要求比子空间法内存多 50%	中	低
子空间法	用于提取大模型的少数阶模态（40 阶以下），适合于较好的实体及壳单元组成的模型，可用内存有限时，该法运行良好	低	高
Power Dynamics 法	用于提取大模型的少数阶模态（20 阶以下），适合于 100 K 以上自由度模型的特征值快速求解。对于网格较粗的模型，只能得到频率近似值；复频情况时可能遗漏模态	高	低
缩减法	用于提取小到中等模型（小于 10 K 自由度）的所有模态，选取合适主自由度时可获取大模型的少数阶（40 阶以下）模态，此时频率计算的精度取决于主自由度的选取	低	低

14.2.2 模态分析步骤

模态分析过程主要有以下 4 个步骤：

1．建模

■ 必须定义质量密度 DENS。
■ 只应用线性单元和材料（如果做了非线性会被忽略）。

2．加载和求解

■ 施加位移约束，没有约束的方向计算刚体阵型。

■ 不允许非零的位移约束。

■ 对称边界只会产生对称振型，所以将会失去一部分阵型，要注意；

■ 忽略外部载荷。

3．扩展模态

即指定扩展方法、模态阶数。对于不同的方法会有所不同，执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Option 菜单命令，弹出 Modal Analysis 对话框，如图 14-1 所示。

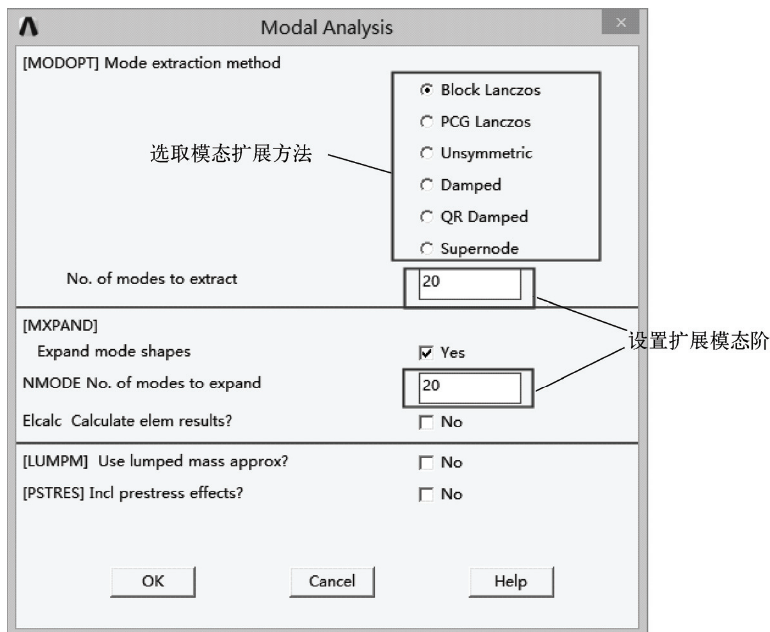


图 14-1 Modal Analysis 对话框

4．观察结果

即列出频率显示阵型、动画显示等后处理。

14.3 实例 1——连杆的模态分析

由于发动机有很高的转速，车用内燃机中连接活塞和曲轴间的连杆往复摆动的频率很高。转速为 2000～6000 r/min，由发动机工作原理可以推得连杆的往复摆动频率范围约为 33.3～100 r/s。

由于连杆的固有频率在此范围内会出现共振使连杆断裂，高速飞出的连杆会把曲轴箱打破后飞出而产生严重后果，造成人员伤亡，故对于连杆的模态分析很必要。图 14-2 所示为连杆断裂事故图。



图 14-2 连杆断裂事故

14.3.1 问题描述

图 14-3 所示为连杆尺寸，质量密度为 7800 kg/m^3，泊松比为 0.3，弹性模量为 210 GPa。本算例采用 CAD 软件建立模型，通过导入几何模型的方式应用于 ANSYS 软件中。

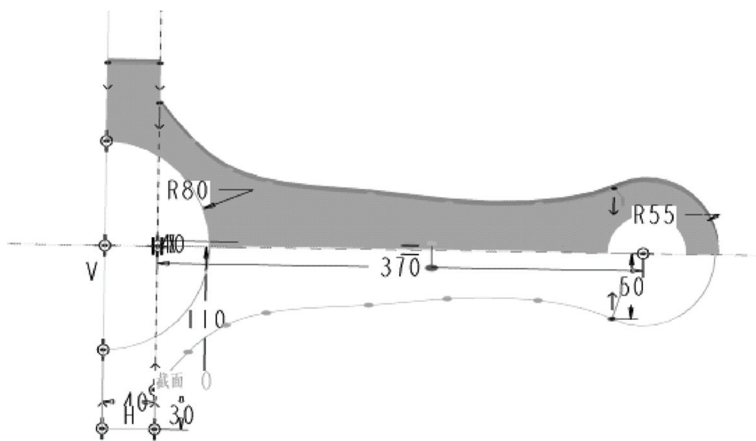


图 14-3 连杆尺寸

14.3.2 问题分析

本算例属于典型的模态分析，由于模型比较复杂，采用 PROE 中已建立完成的模型导入到 ANSYS 中进行。采用单元 SOLID186 进行有限元分析。模型尺寸为毫米制，因此应力和弹性模型单位为 kPa。

14.3.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise14-1”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择

Structural Solid 和 Brick 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，单击 OK 按钮。

3．导入模型文件

执行 File→import→Creo-Parame 菜单命令，在弹出的对话框中选择具体位置。单击 OK 按钮完成导入，导入后的效果如图 14-4 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。

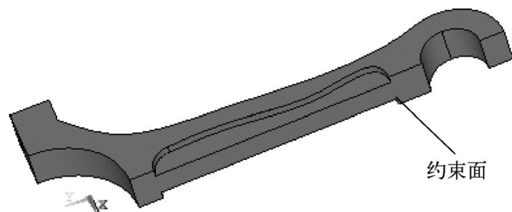


图 14-4　导入连杆实体模型

4．定义材料属性

定义弹性模量和泊松比。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Structural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“210e6”和“0.3”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“7.850e-6”，单击 OK 按钮。

5．划分网格

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 5，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Free 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮拾取所有体完成体网格的划分，网格划分效果如图 14-5 所示。

提示：当警告提示有个别单元角度问题，或是拟合原实体曲线误差过大，可以通过查看命令窗口或错误文件确定单元编号后，通过单元功能解决问题。在 Mesh Tool 工具的下方 Refine 为网格细分，单击此命令后选择或输入（单元号）要细分的单元，单击 OK 按钮会出现图 14-6 所示的对话框以设置细分等级，一般选择 2～4 级就可以了。

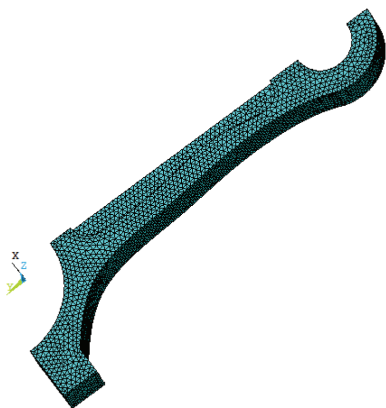


图 14-5　网格划分效果图

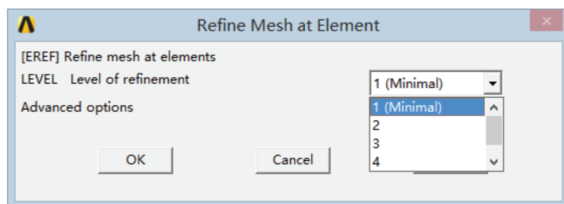


图 14-6　Refine Mesh at Element 对话框

6．定义边界条件

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→On Area 菜单命令，弹出面拾取对话框，输入“26,23”，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选择 All DOF 项，如图 14-7 所示，单击 OK 按钮。

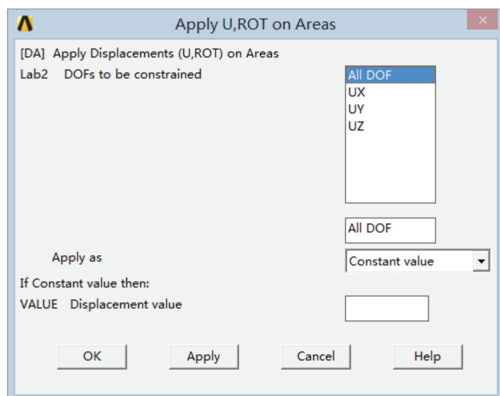


图 14-7 Apply U,ROT on Areas 对话框

7．定义分析类型

设置分析类型可以过滤菜单，只显示本分析类型用到的部分菜单项。为方便分析，在求解方法上也会选择本分析的一些默认设置等。

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，进行求解类型的设置，选中 Modal 单选按钮，如图 14-8 所示，单击 OK 按钮。

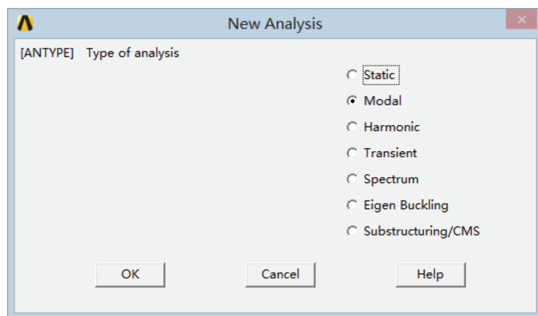


图 14-8 New Analysis 对话框

8．设置求解方法和求解阶次

选择 Block Lanczos 法求解，设置为前 40 阶的固有频率和振型，根据实际应用的情况验证大体多少阶满足要求。

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→AnalysisOptions 菜单命令，弹出 Modal Analysis 对话框，选中 Block Lanczos 单选按钮，No. of modes to extract 项设为 40，MXPAND 选中 Yes，NMODE 项设为 40，如图 14-9 所示，单击 OK 按钮，弹出 Block Lanczos Method 对话框，如图 14-10 所示，取默认设置，单击 OK 按钮。

9．计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load

Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

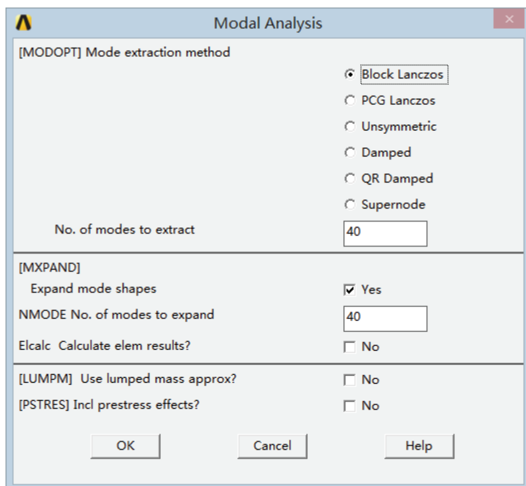


图 14-9　Modal Analysis 对话框

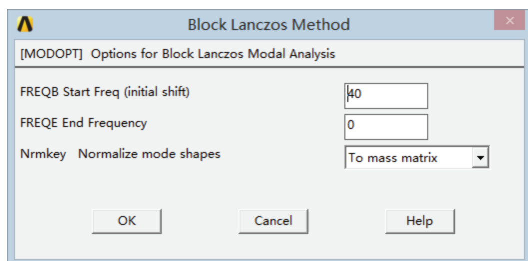
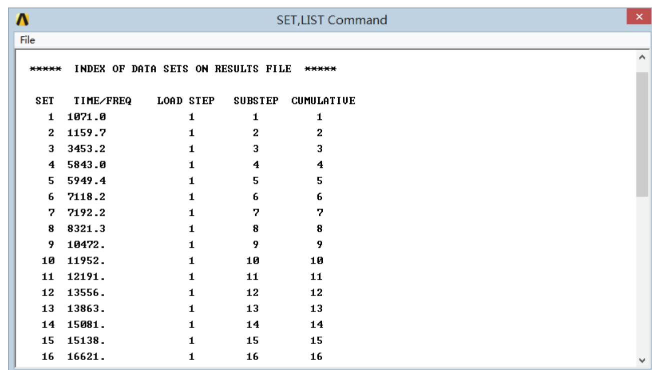


图 14-10　Block Lanczos Method 对话框

10．进行后处理

（1）读取结果概要。执行 General Postproc→Read Summary 菜单命令，弹出模型各阶的频率，如图 14-11 所示，列出了前 16 阶的频率。


SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	1071.0	1	1	1
2	1159.7	1	2	2
3	3453.2	1	3	3
4	5843.0	1	4	4
5	5949.4	1	5	5
6	7118.2	1	6	6
7	7192.2	1	7	7
8	8321.3	1	8	8
9	10472.	1	9	9
10	11952.	1	10	10
11	12191.	1	11	11
12	13556.	1	12	12
13	13863.	1	13	13
14	15081.	1	14	14
15	15138.	1	15	15
16	16621.	1	16	16

图 14-11　结果摘要列表显示

（2）查看动画。显示动画的做法：执行 Utility Menu→Plot Ctrls→Animate→Mode Shape 菜单命令，弹出 Animate Mode Shape 对话框，如图 14-12 所示，单击 OK 按钮即可查看动画图。

（3）读取第一组解并查看振型和位移云图。执行 General Postproc→Read Results→First Set 菜单命令，读取第一组解。

查看振型。执行 Main Menu→Plot→Results→Deformed Shape 菜单命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选中 Def+undeformed 单选按钮，如图 14-13 所示，单击 OK 按钮，效果如图 14-14 所示。

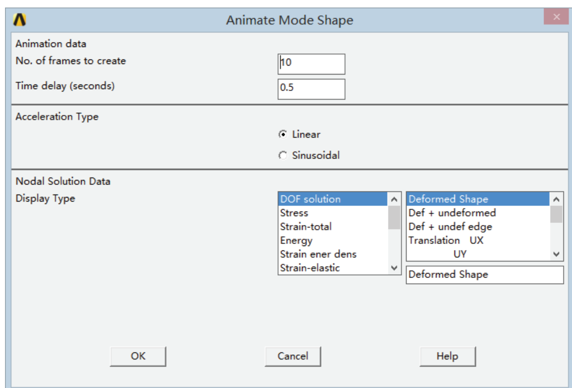


图 14-12 Animate Mode Shape 对话框

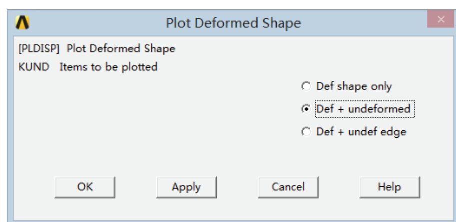


图 14-13 Plot Deformed Shape 对话框

显示位移云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中 DOF Solution→Displacement vector sum，单击 OK 按钮，显示一阶位移云图如图 14-15 所示。

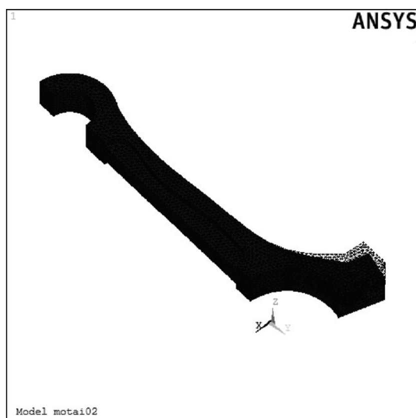


图 14-14 一阶振型效果图

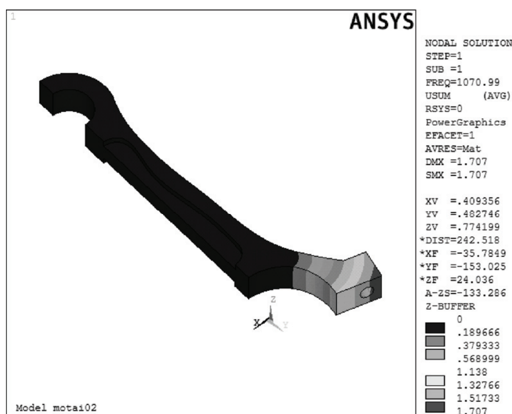


图 14-15 一阶位移云图

（4）读取第二组解并查看振型和位移云图。执行 General Postproc→Read results→Next Set 菜单命令，读取第二组解。

注意：求解完后进入后处理读取第一组结果时选择 First Set 就可以了，也可以通过 By Set Number 选取结果，读者可以自行尝试。

查看振型。执行 Main Menu→Plot→Results→Deformed Shape 菜单命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选中 Def+undeformed 项，单击 OK 按钮，效果图如图 14-16 所示。

显示位移云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中 DOF Solution→Displacement vector sum，单击 OK 按钮，显示二阶位移云图如图 14-17 所示。

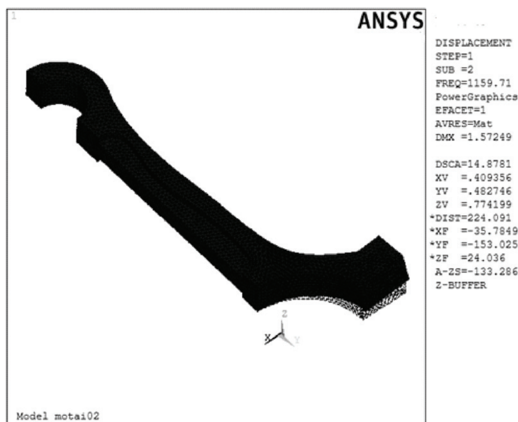


图 14-16　二阶阵型效果图

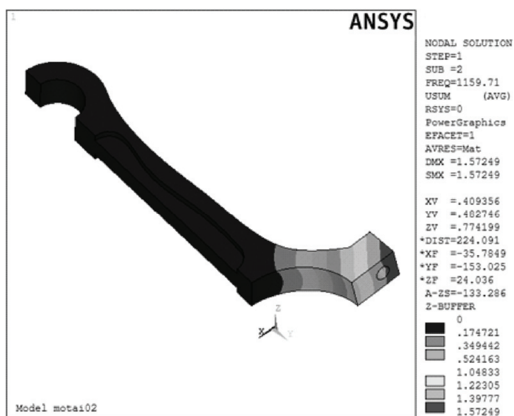


图 14-17　二阶位移云图

11．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

14.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise14-1
/PREP7

ET,1,SOLID186
MP,EX,1,210E6
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7.85E-6
ESIZE,5,,
VMESH,ALL
ASEL,S,,,26
ASEL,A,,,23
DA,ALL,ALL,
/SOLU
ANTYPE,2
MODOPT,LANB,40
EQSLV,SPAR
MXPAND,40, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
MODOPT,LANB,40,40,0, ,OFF
SOLVE
/POST1
SET,LIST
PLDI, ,
ANMODE,10,0.5, ,0
SET,FIRST
```

```
PLDISP,1
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
SET,NEXT
PLDISP,1
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
SAVE
/QUIT
```



14.4 实例 2——框架式建筑物有预应力的模态分析

框架式结构的建筑物在现代的土木工程领域较常见，了解其固有频率可以在设计时避免共振现象的发生，尤其是教学楼。当学生上下课时产生脚步的节律，加之人流量大，其激振可能产生共振，所以研究框架式建筑物的模态分析很有必要。

14.4.1 问题描述

图 14-18 所示为框架结构的简化模型，尺寸支撑面为长×宽×厚=7 m×5 m×0.35 m 的长方体，下方 4 根立柱为长 3.5 m、截面为 0.5 m×0.5 m 的正方形。框架结构为钢筋混凝土，其质量密度为 2551 kg/m^3，泊松比为 0.2，弹性模量为 28 GPa，需要考虑重力影响，重力加速度 g=9.8 m/s^2。求解出前 10 阶频率并显示前 4 阶的振型。



图 14-18 框架结构简化模型

14.4.2 问题分析

钢筋混凝土结构的自重对问题分析的影响较大，需要考虑。上端的板采用壳单元分析，下方的 4 根柱采用梁单元模拟，几何模型相对简单，采用 ANSYS 自带模块 Modeing 下建立。

有预应力的模态分析基本过程如下：

建立模型（包括几何模型和有限元模型）→进行产生预应力的静力学分析→激活预应力选项→加载重力求解→进行模态分析。

14.4.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入

“Exercise14-2”，单击 OK 按钮。

2．建立几何模型

（1）建立关键点。执行 Main Menu→Preprocessor→Moding→Create→Keypoints→In Active CS 菜单命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，KPT 项设为编号 1，输入坐标值（0,0,0），单击 Apply 按钮，再依次建立 2、3、4 号关键点（5,0,0）（5,7,0）（0,7,0），用于创建支撑面；然后继续建立 5、6、7、8 号关键点（0,0,3.5）（5,0,3.5）（0,7,3.5）（5,7,3.5），用于创建支撑梁。

（2）由关键点创建面。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs 菜单命令，弹出 Create Area thru KPs 对话框，输入“1,2,3,4”，如图 14-19 所示，单击 OK 按钮，创建的面如图 14-20 所示。

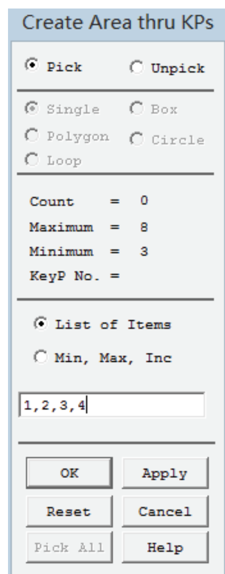


图 14-19 Create Area thru KPs 对话框

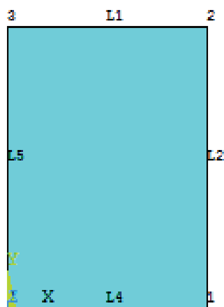


图 14-20 创建的面效果图

（3）由关键点创建直线。执行 Main Menu→Preprocessor→Moding→Lines→Straight line 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，输入“1,5”，单击 Apply 按钮，再依次输入（2,6）（3,7）（4,8），最后单击 OK 按钮退出对话框。

（4）查看效果。执行 PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，KP 和 LINE 项选择 On，如图 14-21 所示，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Plot→Lines 菜单命令，显示线的效果如图 14-22 所示。

3．定义材料属性

（1）定义弹性模量和泊松比。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Structural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“28e9”和“0.2”，单击 OK 按钮。

（2）定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“2551”，单击 OK 按钮。

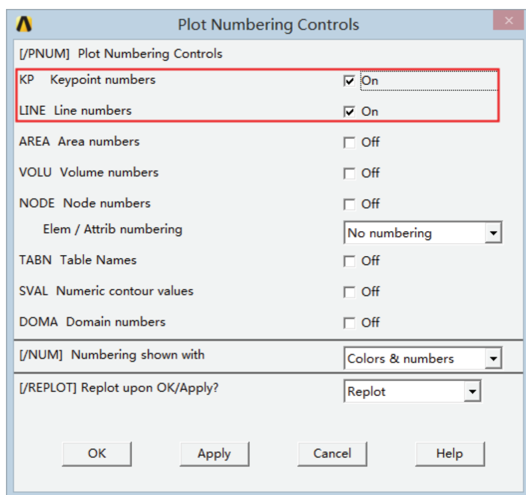


图 14-21　设置显示菜单显示线和关键点编号

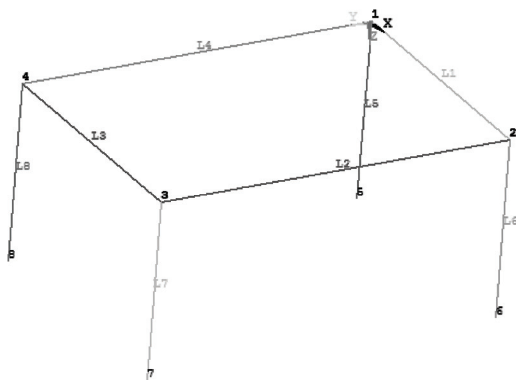


图 14-22　显示线的效果

4．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Beam 和 3 node 189，3 节点 BEAM189 单元，如图 14-23 所示，单击 OK 按钮。继续单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Shell 和 8node 281，8 节点 SHELL281 单元，单击 OK 按钮。

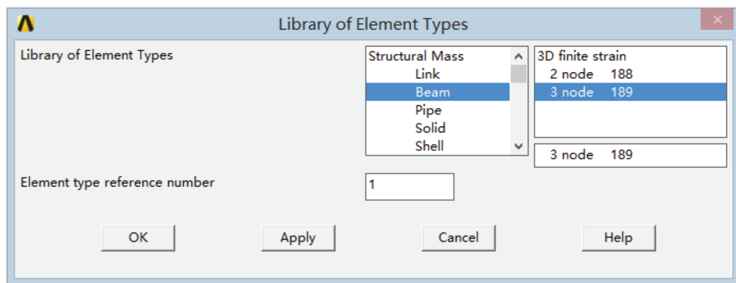


图 14-23　Library of Element Types 对话框

5．设置单元特性

（1）梁单元截面设置。执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Beam→Common Sections 菜单命令，弹出 Beam Tool 对话框，选中正方形截面，B、H 项依次均设为 0.5，如图 14-24 所示，单击 OK 按钮。

（2）壳单元厚度设置。执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Shell→Lay-up→Add/Edit 菜单命令，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框，Thickness 项设为 0.35，其他项保留默认设置，如图 14-25 所示，单击 OK 按钮。



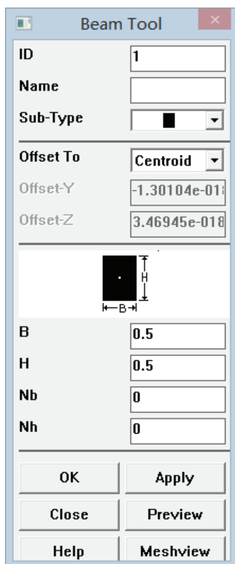


图 14-24　Beam Tool 对话框

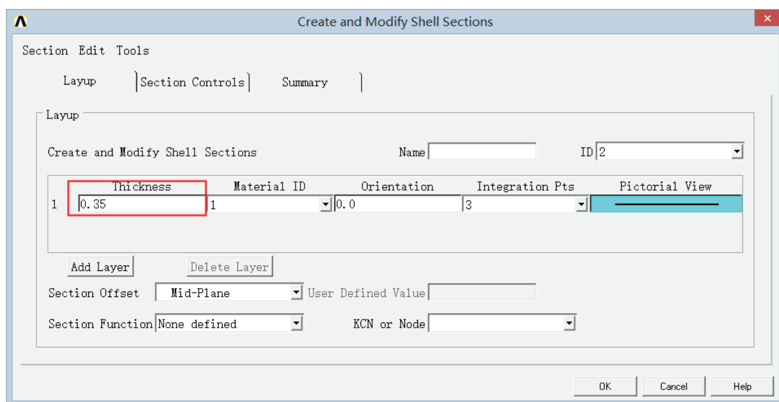


图 14-25　Create and Modify Shell Sections 对话框

6．划分网格

（1）划分面网格。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Areas→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，输入“1”，单击 OK 按钮，弹出 Element Size at Picked Areas 对话框，输入“0.2”，如图 14-26 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 1 号面，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 1 号材料，TYPE 项选中 2 SHELL281 项，SECT 项选择 2，如图 14-27 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→By Corners 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 1 号面，单击 OK 按钮，弹出关键点拾取对话框，依次拾取 1、2、3、4 号面，即完成网格划分。

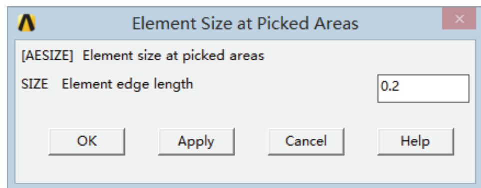


图 14-26　Element Size at Picked Areas 对话框

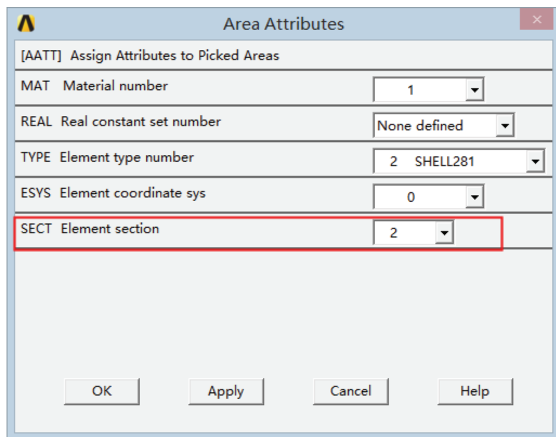


图 14-27　Area Attributes 对话框

（2）划分线网格。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manual Size→Lines→Picked Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，依次拾取 5、6、7、8 四条线，单击 OK 按钮，弹出 Element Sizes on Picked Lines 对话框，SIZE 项设为 0.35，如图 14-28 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，拾取 5、6、7、8 号线，单击 OK 按钮，弹出 Line Attributes 对话框，MAT 项设为 1 号材料，TYPE 项设为 1 BEAM189 项，如图 14-29 所示，单击 OK 按钮。

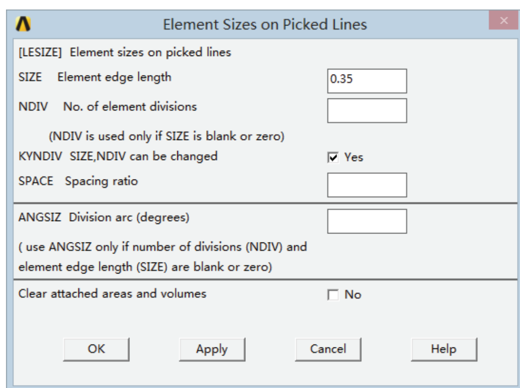


图 14-28 Element Sizes on Picked Lines 对话框

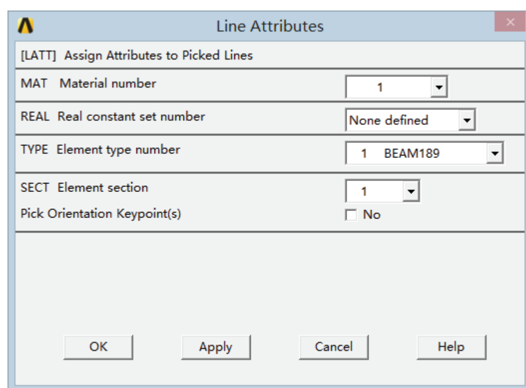


图 14-29 Line Attributes 对话框

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，拾取 5、6、7、8 四条线，单击 OK 按钮，即完成线网格划分。

（3）显示单元形状。执行 Main Menu→PlotCtrl→Style→Size and Shape 菜单命令，弹出 Size and Shape 对话框，/ESHAPE 项选为 ON，单击 OK 按钮。网格划分的效果如图 14-30 所示。

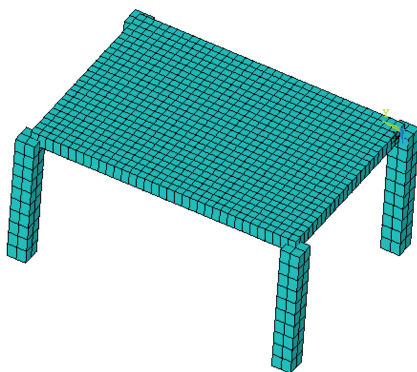


图 14-30 网格划分效果图

7. 进行静力学分析产生预应力

（1）添加重力载荷，执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Inertia→Gravity→Global 菜单命令，弹出 Apply（Gravitational）Acceleration 对话框，ACELZ 项设为 9.8，如图 14-31 所示，单击 OK 按钮。



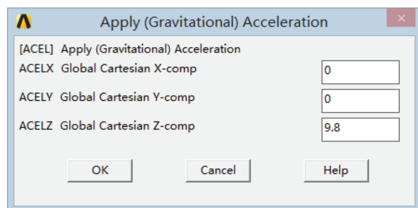


图 14-31　Apply（Gravitational）Acceleration 对话框

（2）对关键点 5、6、7、8 施加全约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→On Keypoints 菜单命令，弹出节点拾取对话框，依次输入"5,6,7,8"，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on KPs 对话框，选择 All DOF 项，单击 OK 按钮。

（3）进行静力分析获得预应力。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

（4）结束静力学分析。执行 Main Menu→Finish 菜单命令。

提示：此时已经进行完静力学求解，Finish 表示结束保存求解结果也就是通常所说的求解中断技术。

8．进行模态分析

（1）定义模态分析。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Modal 单选按钮，单击 OK 按钮。

（2）选择模态求解方法，提取阶次数。分块法提取 10 阶模态并扩展，打开预应力选项等。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Options Analysis 菜单命令，弹出 Modal Analysis 对话框，选中 Block Lanczos 单选按钮，No. of modes to extract 项设为 10，MXPAND 选中 Yes 复选框，NMODE 项设为 10，PSTRES 项选中 Yes 复选框，如图 14-32 所示。单击 OK 按钮，弹出 Block Lanczos Method 对话框，设置提取模态的频率范围限制，可以选择默认设置，单击 OK 按钮。

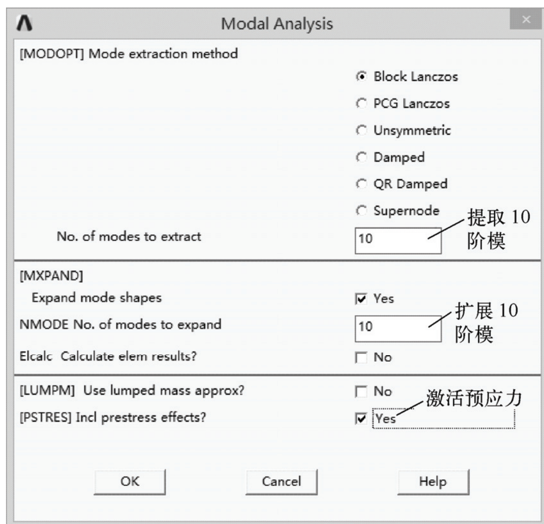


图 14-32　选择模态求解方法和提取阶次数

（3）求解计算频率振型。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。当出现 Note 提示框时，表示求解结束。

9．进行后处理

（1）读取结果概要。执行 General Postproc→Read Summary 菜单命令，弹出模型结果各阶的频率如图 14-33 所示，列出前 15 阶频率。

SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	1071.0	1	1	1
2	1159.7	1	2	2
3	3453.2	1	3	3
4	5843.0	1	4	4
5	5949.5	1	5	5
6	7118.3	1	6	6
7	7192.0	1	7	7
8	8321.3	1	8	8
9	10472.	1	9	9
10	11951.	1	10	10
11	12191.	1	11	11
12	13556.	1	12	12
13	13864.	1	13	13
14	15081.	1	14	14
15	15138.	1	15	15

图 14-33　结果概要显示

从结果可以看出 1，2 阶频率相近，设计时应避免激振频率相靠近或整数倍产生共振现象。

（2）查看 1 阶振型。

读取第一组解并查看振型，执行 General Postproc→Read Results→First Set 和 Utility Menu→Plot→Results→Deformed Shape 菜单命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选中 Def+undeformed 项，单击 OK 按钮，一阶振型如图 14-34 所示，可以明显看出振型向左。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum，单击 OK 按钮，一阶振型位移分布云图如图 14-35 所示。

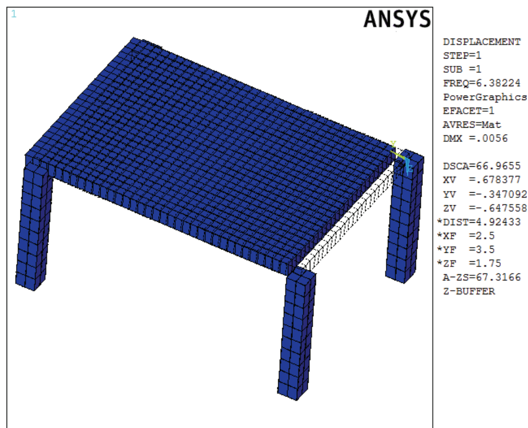


图 14-34　一阶振型

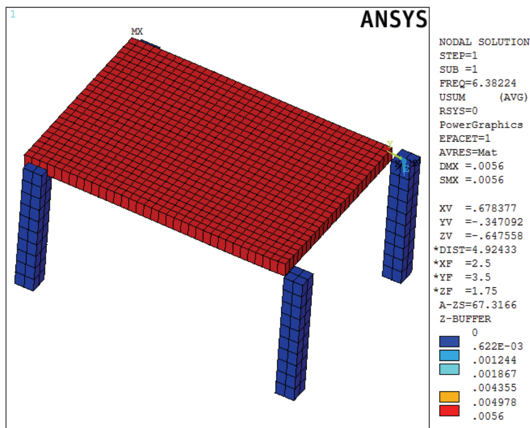


图 14-35　一阶振型位移分布云图

（3）查看 4 阶振型。

读取第四组解并查看振型，执行 General Postproc→Read results→By Pick 菜单命令，弹出 Results File 对话框，选中 4 项，如图 14-36 所示。

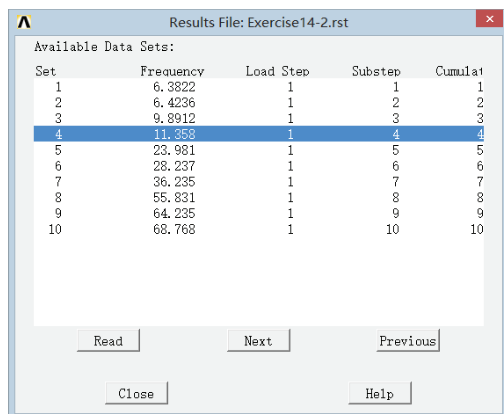


图 14-36　Results File 对话框

执行 Utility Menu→Plot→Results→Deformed Shape 菜单命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选中 Def+undeformed 项，单击 OK 按钮，4 阶振型如图 14-37 所示，可以明显看出振型已经比较复杂。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum，单击 OK 按钮，4 阶振型位移分布云图如图 14-38 所示。

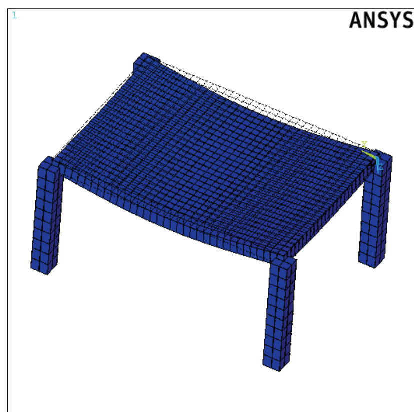


图 14-37　4 阶振型

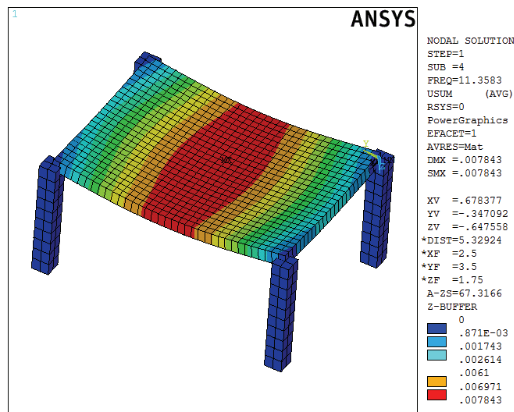


图 14-38　4 阶振型位移分布云图

10．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

14.4.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
```

```
/FILNAME,Exercise14-2
/PREP7
K,1,0,0,0,
K,2,5,0,0,
K,3,5,7,0,
K,4,0,7,0,
K,5,0,0,3.5,
K,6,5,0,3.5,
K,7,5,7,3.5,
K,8,0,7,3.5,
A,1,2,3,4
LSTR,       1,       5
LSTR,       2,       6
LSTR,       3,       7
LSTR,       4,       8
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
LPLOT
MP,EX,1,28E9
MP,PRXY,1,0.2
MP,DENS,1,2551
ET,1,BEAM189
ET,2,SHELL281
SECTYPE,    1, BEAM, RECT, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.5,0.5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
sect,2,shell,,
secdata, 0.35,1,0.0,3
secoffset,MID
seccontrol,,,, , , ,
ASEL,S,,,1
AESIZE,1,0.2,
AATT,       1, ,    2,       0,    2
AMAP,1,1,2,3,4
LSEL,S,,,5,8,1
LESIZE,ALL,0.35, , , , , , ,1
LATT,1, ,1, , , ,1
LMESH,ALL
/ESHAPE,1.0
ACEL,0,0,9.8,
KSEL,S,,,5,8,1
DK,ALL, , , ,0,ALL, , , , , ,
/SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
```



```
SET,LIST
SET,FIRST
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
PLDISP,1
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
SET,LIST,999
SET,,, ,,, ,4
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
PLDISP,1
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
SAVE
/QUIT
```

14.5 本章小结

本章主要讲解了动力学分析中的模态分析。模态分析是动力学分析的基础分析，本章对模态分析的基本理论进行了详细介绍，并通过两个典型例子（连杆模态分析和框架模态分析），帮助读者掌握模态分析的分析方法。



第 15 章　结构瞬态分析

本章主要介绍结构瞬态分析的基本理论和求解方法，并通过两个实例详细讲解结构瞬态分析的操作流程，以及分析过程中需要的注意事项。

学习目标：

（1）了解瞬态分析的基本原理及求解方法的特点；

（2）掌握瞬态分析的过程；

（3）通过实例的练习掌握时间载荷的加载方法；

（4）掌握时间历程后处理器的一般应用。

15.1　概述

瞬态动力学分析，也称为时间历程分析，用于确定承受任意随时间变化载荷的结构动力学响应情况。它可以用来确定结构在静载荷、瞬变载荷和任意简谐载荷的任意组合作用下随时间变化的位移、应力和应变情况。

本节讲解瞬态分析的基础理论，介绍运动方程的求解方法以及各种方法之间的优缺点。在本节的最后还详细讲解瞬态分析中关键的技术时间步长的选取准则。

15.1.1 瞬态动力学分析的基本理论

瞬态动力学分析确定随时间任意变化载荷作用下的结构响应。如果使用完整法求解，允许出现各种非线性（几何、材料、状态）；但使用其他方法如缩减法和模态叠加，都不能出现非线性。运动方程：

$$\boldsymbol{M}\ddot{U} + \boldsymbol{C}\dot{U} + \boldsymbol{K}U = F(t) \tag{15-1}$$

ANSYS 求解上式，为 Newmark 时间积分法，也就是常说的隐式积分，也称直接法，与之对应的是显示积分（可允许更大的大变形，显示动力学分析）。本章不考虑非线性问题，Newmark 法基本原理如下：

Newmark 的逐步积分格式，其基本假设如下

$$U'_{n+1} = U'_{n} + [(1-\delta)U''_{n} + \delta U''_{n+1}]\Delta t \tag{15-2}$$

$$U_{n+1} = U'_{n} + U'_{n}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2}-\alpha\right)U''_{n} + \alpha U''_{n+1}\right]\Delta t^{2} \tag{15-3}$$

式中，α,δ 为 Newmark 积分参数（根据精度和稳定适当调节）；其中 $\Delta t = t_{n+1} - t_{n}$；$U_{n}$、$U'_{n}$、$U''_{n}$ 分别为 t_{n} 时刻的节点位移、速度、加速度，U_{n+1}、U'_{n+1}、U''_{n+1} 分别为 t_{n+1} 时刻的节点位移、速度、加速度。

当$0.5 \leqslant \delta$且$0.25(0.5+\delta)^2 \leqslant \alpha$时，Newmark 法是无条件稳定，即在任何条件下，对于任何步长t_n，特别是当t_n / T很大时，解都不会无限增大。如果仅当t_n / T小于一个稳定极限时，上述结果才成立，这种积分法为条件稳定。

15.1.2 求解方法及其优缺点

瞬态动力学分析可采用 3 种方法：完全（Full）法、模态叠加法及缩减（Reduced）法。ANSYS/Professional 产品中只允许用模态叠加法。在研究如何实现这些方法之前，让我们先探讨一下各种方法的优点和缺点。

1．完全法

完全法采用完整的系统矩阵计算瞬态响应（没有矩阵缩减）。它是 3 种方法中功能最强的，允许包括各类非线性特性（塑性、大变形、大应变等）。

注意：如果并不想包括任何非线性，应当考虑使用另外两种方法中的一种。这是因为完全法是 3 种方法中成本最大的一种。

完全法的优点：

- 容易使用，不必关心选择主自由度或振型。
- 允许各种类型的非线性特性。
- 采用完整矩阵，不涉及质量矩阵近似。
- 一次分析就能得到所有的位移和应力。
- 允许施加所有类型的载荷：节点力、外加的（非零）位移（不建议采用）和单元载荷（压力和温度），还允许通过 TABLE 数组参数指定表边界条件。
- 允许在实体模型上施加载荷。

完全法的主要缺点是它比其他方法成本高。

2．模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的振型（特征值）乘上因子并求和来计算结构的响应。此法是 ANSYS/Professional 程序中唯一可用的瞬态动力学分析法。

模态叠加法的优点：

- 对于许多问题，它比缩减法或完全法更快开销更小。
- 只要模态分析不采用 PowerDynamics 方法，通过 LVSCALE 命令将模态分析中施加的单元载荷引入到瞬态分析中。
- 允许考虑模态阻尼（阻尼比作为振型号的函数）。

模态叠加法的缺点：

- 整个瞬态分析过程中时间步长必须保持恒定，不允许采用自动时间步长。
- 唯一允许的非线性是简单的点点接触（间隙条件）。
- 不能施加强制位移（非零）位移。

3．缩减法

缩减法通过采用主自由度及缩减矩阵压缩问题规模。在主自由度处的位移被计算出来后，ANSYS 可将解扩展到原有的完整自由度集上（参见“第 14 章模态分析”中的“矩阵缩

减”部分对缩减过程的详细讨论）。

缩减法的优点是比完全法快且开销小。

缩减法的缺点：

- 初始解只计算主自由度的位移，第二步进行扩展计算，得到完整空间上的位移、应力和力。
- 不能施加单元载荷（压力、温度等），但允许施加加速度。
- 所有载荷必须加在用户定义的主自由度上（限制在实体模型上施加载荷）。
- 整个瞬态分析过程中时间步长必须保持恒定，不允许用自动时间步长。
- 唯一允许的非线性是简单的点点接触（间隙条件）。

表 15-1 总结了瞬态动力学分析中允许施加的载荷。除惯性载荷外，其他载荷均可以施加到实体模型（关键点、线和面）或有限元模型（节点和单元）上。

表 15-1 瞬态动力学分析中可用的载荷

载 荷 类 型	范 畴	更多信息参见
Displacement： UX,UYUZ ROTX,ROTY,ROTZ	约束	ANSYS 基本分析指南中“DOF 约束”
Force,Moment：FX,FY,FZ；MX,MY,MZ	力	ANSYS 基本分析指南中“力（集中载荷）”
Pressure：PRES	面载荷	ANSYS 基本分析指南中“表面载荷”
Temperature：TEMP Fluence：FLUE	体载荷	ANSYS 基本分析指南中“体载荷”
Gravity,Spinning 等	惯性载荷	ANSYS 基本分析指南中“惯性载荷”

用户可以通过以下操作选择求解方法，执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，选中 Transient 瞬态分析选项，如图 15-1 所示，弹出 Transient Analysis 对话框，如图 15-2 所示，选择相应的瞬态分析选项。

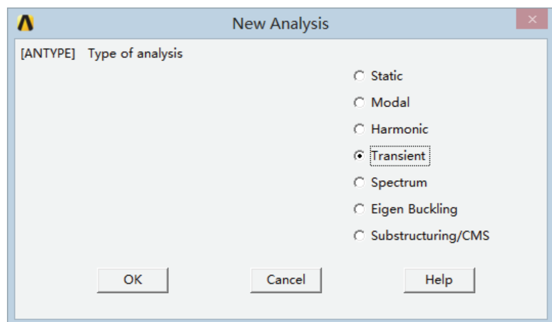


图 15-1 New Analysis 对话框

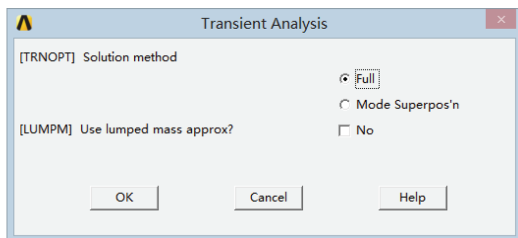


图 15-2 Transient Analysis 对话框

以完全法为例说明载荷步的设置方法。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，如图 15-3 所示。

设置施加步长，执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Time /Frequence→Time-Time Step 菜单命令，弹出 Time and Time Step Options 对话框，如图 15-4 所示。

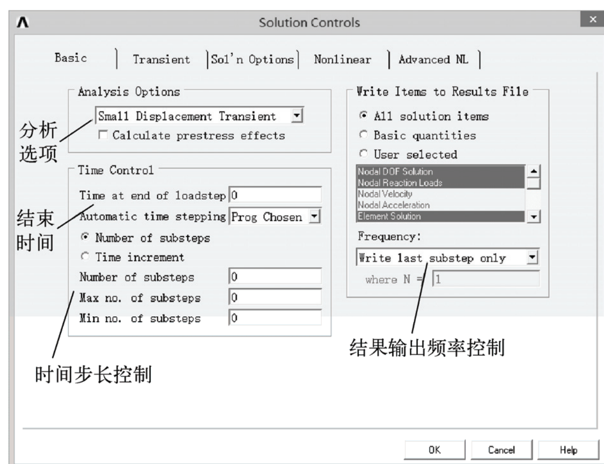


图 15-3　Solution Controls 对话框

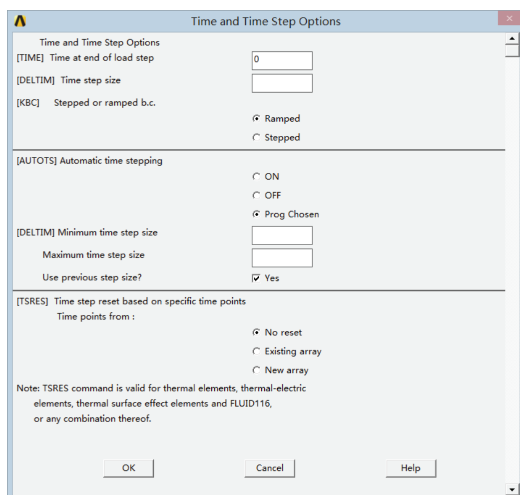


图 15-4　Time and Time Step Options 对话框

无论是完全法、缩减法，还是模态叠加法，积分时间的设置是通用的。但对于求解设置，不同方法的选项则不同，完全法可以考虑各种非线性，因此较常用。

15.1.3 瞬态分析积分步长选取准则

瞬态分析的关键技术，就是积分步长的选取。瞬态积分的精度取决于时间步长 Δt 的大小。时间步长越小，精度越高，但如果太小就会浪费计算资源，太大的时间步长就会引发高阶模态响应误差，影响整体响应。因此，选取适当的步长就十分必要。如果能够求出对整体结构有贡献的最高阶模态频率 f 。时间步长可由下式确定：

$$\Delta t = \frac{1}{20f} \tag{15-4}$$

其中，f 为所关心的最高频率。

载荷突变时要有足够小的时间步长，能够捕捉到载荷的突变。

在接触问题时间步长应能够捕捉两个接触体之间的能量传递。

$$\Delta t = \frac{1}{30 f_c} \tag{15-5}$$

其中，f 为接触频率 $f_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$，$k$ 为接触间隙刚度，m 为等效质量。

自动时间步长为试图按响应频率和非线性效果来调节时间步长。保证精度的前提下减少子步总数，达到减少计算时间的目的。对于新手，建议选取自动时间步长。

15.2 实例 1——冲击载荷作用下的管子

15.2.1 问题描述

图 15-5 所示为管道系统中的一段管子，长 5 m，在其中部受到一个冲击力作用，瞬态分析此问题。管子材料为合金钢，外径为 0.30 m，厚 0.03 m。一端固定，另一端受到 F=4.2×10^3 N 的轴向载荷作用，中间部分受到冲击载荷 $F(t)$作用。材料弹性模量 2×10^{11} Pa，泊松比 0.3，质量密度 7.8×10^3 kg/m^3。管道模型和 $F(t)$变化规律如图 15-6 所示。求最大位移对应的时间值——临界时间，并绘制出最大位移点随时间变化的位移—时间图。

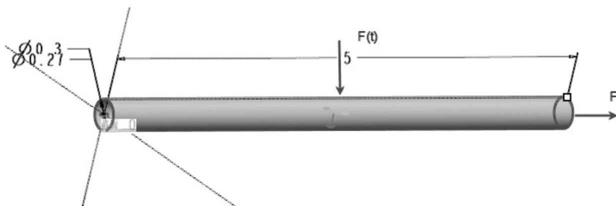


图 15-5 管道受力简图

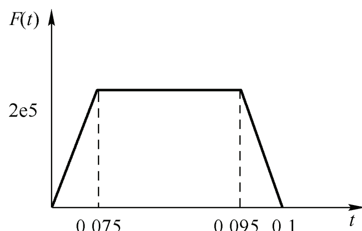


图 15-6 $F(t)$变化示意图

15.2.2 问题分析

本题由于有预应力效果，可以考虑用模态叠加法进行瞬态分析。对此只需在模态分析之前计算预应力，然后进行模态叠加。瞬态分析的基本过程与不考虑预应力时相同。其基本步骤如下：

（1）建立模型。

（2）获取有预应力的模态解。

（3）获取模态叠加法瞬态分析解。

（4）扩展模态叠加解。

（5）查看结果。

15.2.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise15-1”，单击 OK 按钮。



2．建立几何模型

直接建立空心圆柱体。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Hollow Cylinder 菜单命令，弹出 Hollow Cylinder 对话框，通过 WP X、WP Y 项设置圆心坐标，Rad-1、Rad-2 项分别设为 0.3/2 和 0.27/2，Depth 项设为 5，如图 15-7 所示，单击 OK 按钮。建立的几何模型如图 15-8 所示。

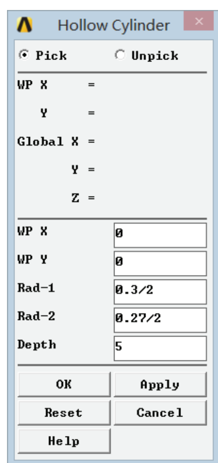


图 15-7　Hollow Cylinder 对话框

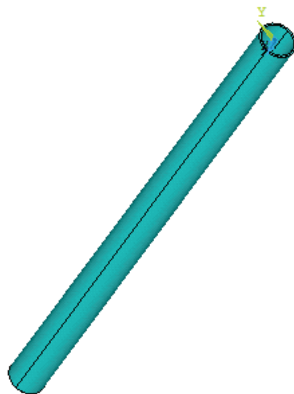


图 15-8　几何模型图

3．定义材料属性

输入必要参数，包括弹性模量 EX、XY 方向，泊松比 PRXY，质量密度 Dens。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“2e11”和“0.3”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“7800”，单击 OK 按钮。

4．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Solid 和 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，如图 15-9 所示。

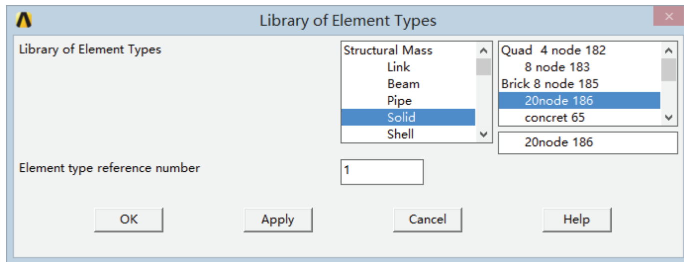


图 15-9　Library of Element Types 对话框

5．划分网格

（1）定义单元尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Sizes 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 0.04，如图 15-10 所示，单击 OK 按钮。

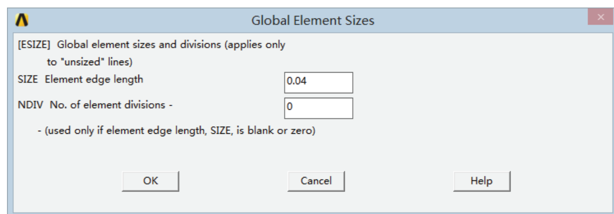


图 15-10 Global Element Sizes 对话框

（2）定义体属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→All Volumes 菜单命令，弹出 Volume Attributes 对话框，保留默认设置，单击 OK 按钮。

（3）划分网格。扫略方法划分网格可以实现高质量的网格划分，不过这种方法只适用于结构规则的几何形体的划分。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume Sweep→Sweep 菜单命令，弹出体拾取对话框，选取界面中的实体，单击 OK 按钮完成网格划分，其效果如图 15-11 所示。

6．通过静力分析计算预应力

（1）端面添加全约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取图 15-12 所示的全约束端面，即 2 号面，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 All DOF 项，单击 OK 按钮结束。

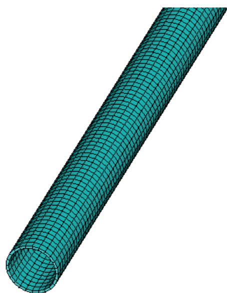


图 15-11 划分网格效果图

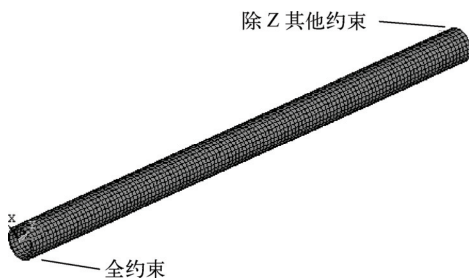


图 15-12 载荷施加位置是示意图

（2）定义另一端面上 UZ、UY 方向的约束，实体单元没有转动自由度。用户可以通过选取另一端面的所有节点，再在节点上定义约束的方式来实现载荷的施加。

选取另一个端面，执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选择 Areas、By Num/Pick、From Full，如图 15-13 所示，单击 OK 按钮，弹出面拾取对话框，拾取另一个端面，即 1 号面，单击 OK 按钮，完成 1 号面的选取。

选取端面上的节点。再次执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选择 Nodes、Attached to、Areas,All、From Full，如图 15-14 所示，单

击 OK 按钮，实现另一个面上节点的选取。



图 15-13 面选择对话框

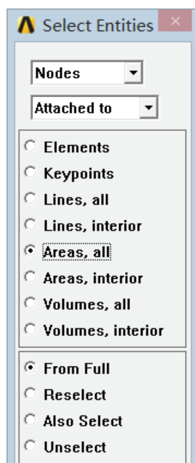


图 15-14 节点选择对话框

定义另一端面上的约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→on Node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，选中 UX、UY 项，如图 15-15 所示，单击 OK 按钮。

（3）施加轴向载荷。在 1 号面的所有节点上施加轴向载荷。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Force/Moment→On node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，选中 FZ 项，输入“4.2E3”，如图 15-16 所示，单击 OK 按钮，完成轴向力的设置。

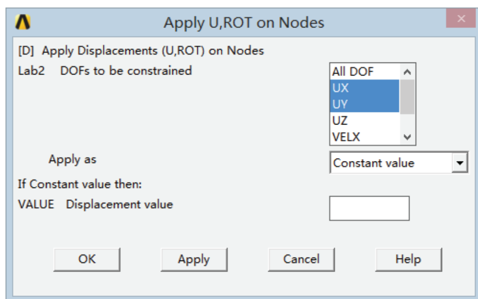


图 15-15 Apply U,ROT on Nodes 对话框

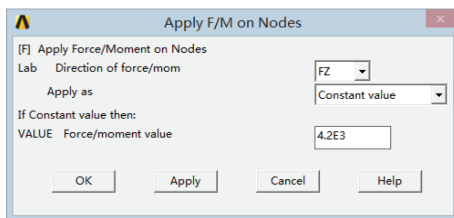


图 15-16 Apply F/M on Nodes 对话框

（4）求解计算。执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。当出现 Note 提示框时，表示求解结束。执行 UtilityMenu→File→Save AS 菜单命令，将文件另存到适当的位置。

（5）结束静力学分析。执行 Main Menu→Finish 菜单命令。

7．有预应力的模态计算

（1）建立模态分析项目。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单

命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Modal 单选按钮，单击 OK 按钮。

（2）求解设置。求解前 25 阶的模态解，并扩展解。

打开预应力选项，执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→AnalysisOptions 菜单命令，弹出 Modal Analysis 对话框，选中 Block Lanczos 单选按钮，No. of modes to extract 项设为 25，MXPAND 项选中 Yes 复选框，NMODE 项设为 25，PSTRES 项选中 Yes 复选框，如图 15-17 所示，单击 OK 按钮，弹出 Block Lanczos Method 对话框，设置提取模态的频率范围限制，可以选择默认设置，如图 15-18 所示，单击 OK 按钮。

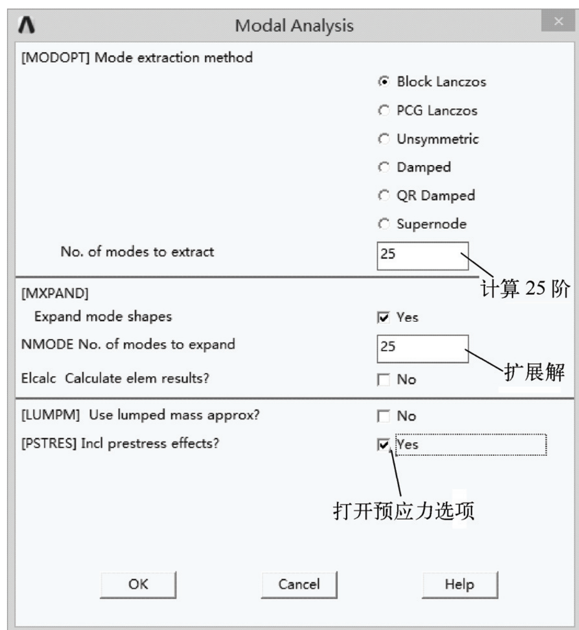


图 15-17 求解设置

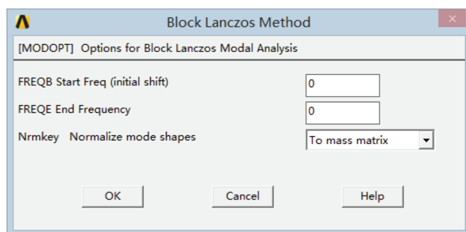


图 15-18 Block Lanczos Method 对话框

提示：如果在瞬态分析中需要施加单元载荷（压力、温度、加速度等），则必须在模态分析中施加，并写入 Jonname.Mode 文件，在瞬态分析中使用这些载荷向量。

注意：

（1）模态提取方法可以用 Block Lanczos 法、缩减法、PCG 法其他的方法不能用于模态叠加法，求解瞬态分析。

（2）指定约束应在模态分析中进行。若在模态叠加的瞬态分析中指定，将被忽略。

（3）计算当前的模型。执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。当出现 Note 提示框时，表示求解结束。执行 UtilityMenu→File→Save AS 菜单命令，将文件另存到适当的位置。

（4）查看结果概要列表（感兴趣的读者可以查看，查看并不影响下一步操作）。执行 General Postproc→Read Summary 菜单命令，弹出模型结果的各阶频率，如图 15-19 所示，列出前 15 阶。

SET,LIST Command

File

```
*****  INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE  *****

 SET   TIME/FREQ    LOAD STEP   SUBSTEP  CUMULATIVE
   1  48.281            1          1         1
   2  48.281            1          2         2
   3  151.17            1          3         3
   4  151.17            1          4         4
   5  253.28            1          5         5
   6  299.22            1          6         6
   7  299.22            1          7         7
   8  326.82            1          8         8
   9  469.86            1          9         9
  10  469.86            1         10        10
  11  474.74            1         11        11
  12  474.74            1         12        12
  13  480.91            1         13        13
  14  480.91            1         14        14
  15  487.36            1         15        15
```

图 15-19　各阶模态

（5）结束当前分析。执行 Main Menu→Finish 菜单命令。

提示：求解模态的多少直接影响到模态叠加法求解瞬态分析的精度。由于初学者没有一定的经验，一般应适当地多选取一些，以保证求解的质量。

8．模态叠加法瞬态分析

（1）开始瞬态分析项目并选择求解方法。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient 单选按钮，单击 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，选中 Mode Superpos'n 单选按钮，即选择模态叠加法，如图 15-20 所示，单击 OK 按钮。

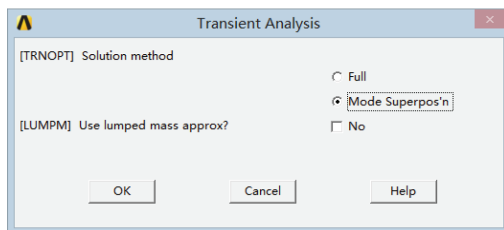


图 15-20　Transient Analysis 对话框

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Mode Sup Transient Analysis 对话框，采取默认设置，如图 15-21 所示，单击 OK 按钮。

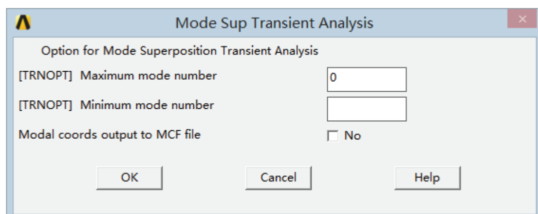


图 15-21　Mode Sup Transient Analysis 对话框

注意：指定应用于模态叠加的模态数，这个数目决定瞬态分析的精度，至少应包含对响应有影响的所有模态。这里选取模态分析的所有计算出的所有模态。

（2）施加时间历程载荷 *F*(*t*)。

施加随时间变化的载荷方法较多，可以通过多载荷步法、表格载荷法、函数载荷法等。考虑到本题中的载荷 *F*(*t*)的特点，采取表格法加载。其基本的思路：首先，用表格表示载荷—时间；其次，用数组参数定义载荷随时间变化的表；最后，施加表载荷，一次性施加一个载荷步，一次性求解。基本过程：创建参数表格→施加已有表载荷→表载荷步控制。

1）定义表格。执行 Utility Menu→Parameter→Array Parameter→Define/Edit 菜单命令，弹出 Array Parameters 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Add New Array Parameter 对话框，Par 项设为 F(t)，Parameter type 项选中 Table 单选按钮，I,J,K 项分别设为 4、1、1，Var1 项设为 time，如图 15-22 所示，单击 OK 按钮。

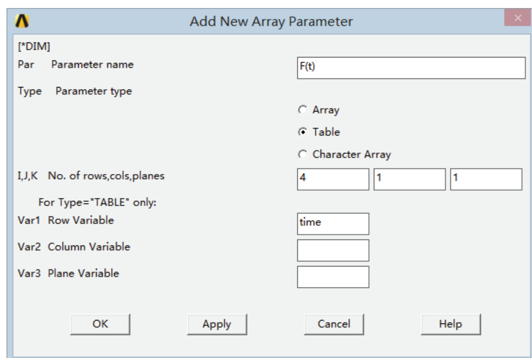


图 15-22 Add New Array Parameter 对话框

2）填写表格。在 Array Parameters 对话框中，选中 F 项，如图 15-23 所示，单击 Edit 按钮，弹出 Table Array 定义对话框，在表格中输入时间—载荷各参数，如图 15-24 所示，完成后按图中提示操作，先 Apply（保存）再 Quit（退出）。

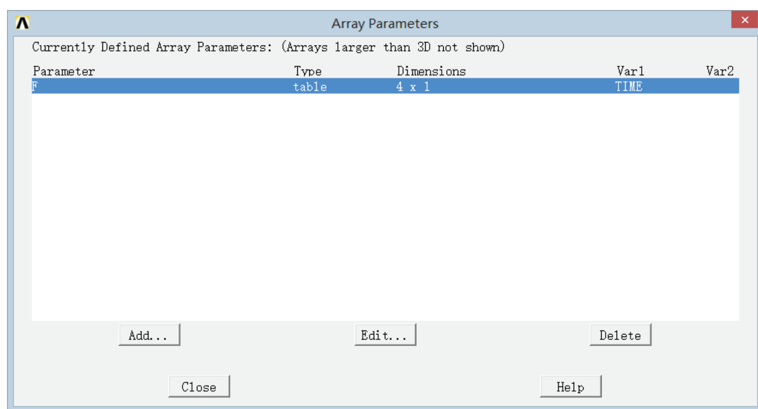


图 15-23 设置时间—载荷表



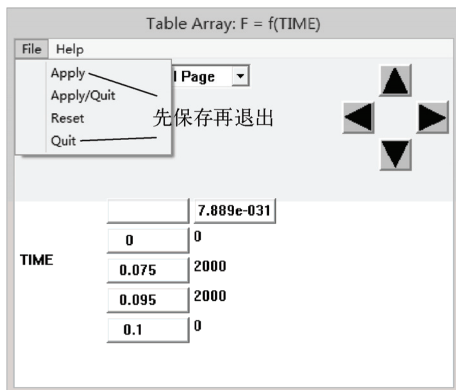


图 15-24 Table Array 定义对话框

3）施加表格载荷。

首先选取 Z=2.5 的所有节点。执行 UtilityMenu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，从上至下依次选择 Nodes、By Location、Z coordinates、From Full，在文本框中输入 2.5，如图 15-25 所示，单击 OK 按钮。

施加载荷，执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Force/moment→On node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，Lab 项选中 FX，在 Apply as 下拉列表框中选中 Existing table，如图 15-26 所示，单击 OK 按钮，在弹出的 Table 表中选中 F 项，单击 OK 按钮。

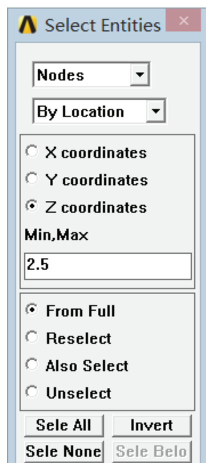


图 15-25 选取 Z=2.5 的节点

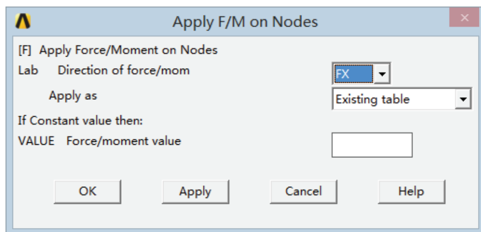


图 15-26 选取表载荷

（3）载荷步控制。执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Time/Frequence→Time-Time Step 菜单命令，弹出 Time and Time Step Options 对话框，TIME 项设为 0.1，在 DELTIM 项设为 0.003，AUTOTS 项选中 ON 复选框，在 DELTIM 项中设置最小时间子步为 0.002，最大时间子步为 0.006，如图 15-27 所示，单击 OK 按钮。

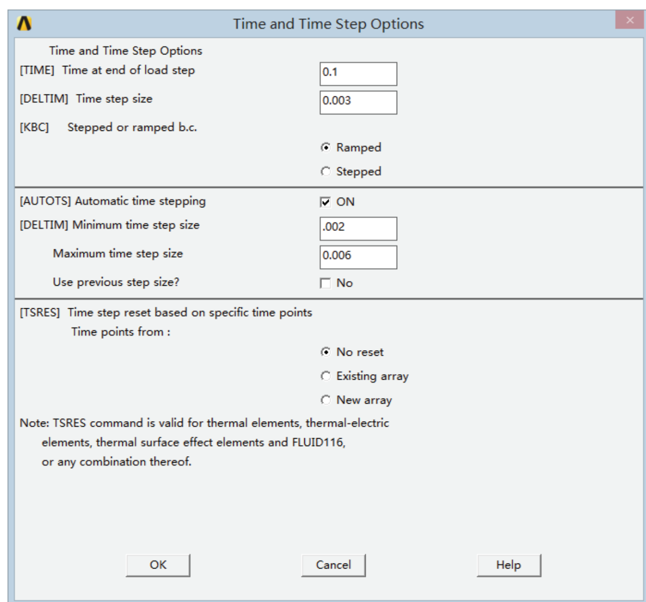


图 15-27 Time and Time Step Options 对话框

（4）设置输出结果。执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Output Ctrls→Solu Printout 菜单命令，弹出 Solution Printout Controls 对话框，FREQ 项选中 Every substep 单选按钮，如图 15-28 所示，单击 OK 按钮。

（5）执行 Utility Menu→File→Save As 菜单命令，将文件另存到适当的位置。

（6）计算求解。执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。当出现 Note 提示框时，表示求解结束。执行 Utility Menu→File→Save AS 菜单命令，将文件另存到适当的位置。

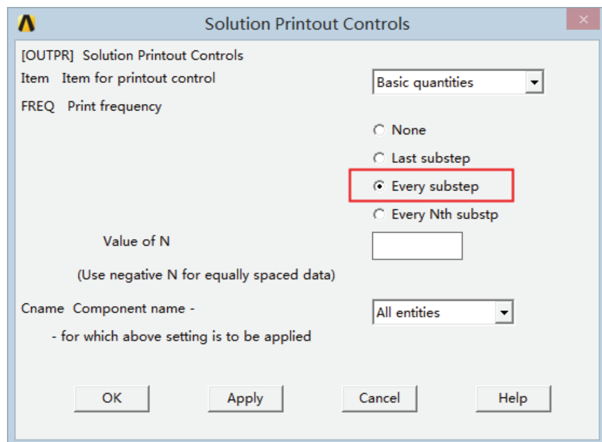


图 15-28 Solution Printout Controls 对话框

9．后处理

对于随时间变化的载荷进行后处理选用时间-历程后处理器 Post26。绘制位移时间曲

线，找出最大位移对应的时间值——临界时间。

（1）查看 Z=2.5，Y=−0.15 位置的节点编号为 15424。

选取 Z=2.5 的节点。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，从上至下依次选择 Nodes、By Location、Z coordinates、From Full，在文本框中输入“2.5”，单击 OK 按钮。

列表显示所选节点，找到 Y=−0.15 的节点表号。执行 UtilityMenu→List→Node 菜单命令，弹出 Sort Node Listing 对话框，采取默认设置，单击 OK 按钮，弹出 NLIST Command 列表框，查找到目标节点的编号为 15424，如图 15-29 所示。

提示：根据材料力学或弹性力学都可以知道，位于此位置的节点的受力最大，应力对应的位移也就最大，以此找到位移最大时间。

NLIST Command

File

NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX
10933	0.10607	0.10607	2.5000	0.00	0.00	0.00
10934	0.75000E-01	0.12990	2.5000	0.00	0.00	0.00
10935	0.38823E-01	0.14489	2.5000	0.00	0.00	0.00
10936	0.0000	0.15000	2.5000	0.00	0.00	0.00
10937	-0.38823E-01	0.14489	2.5000	0.00	0.00	0.00
10938	-0.75000E-01	0.12990	2.5000	0.00	0.00	0.00
10939	-0.10607	0.10607	2.5000	0.00	0.00	0.00
10940	-0.12990	0.75000E-01	2.5000	0.00	0.00	0.00
10941	-0.14489	0.38823E-01	2.5000	0.00	0.00	0.00
15419	-0.14489	-0.38823E-01	2.5000	0.00	0.00	0.00
15420	-0.12990	-0.75000E-01	2.5000	0.00	0.00	0.00
15421	-0.10607	-0.10607	2.5000	0.00	0.00	0.00
15422	-0.75000E-01	-0.12990	2.5000	0.00	0.00	0.00
15423	-0.38823E-01	-0.14489	2.5000	0.00	0.00	0.00
15424	0.0000	-0.15000	2.5000	0.00	0.00	0.00
15425	0.38823E-01	-0.14489	2.5000	0.00	0.00	0.00
15426	0.75000E-01	-0.12990	2.5000	0.00	0.00	0.00
15427	0.10607	-0.10607	2.5000	0.00	0.00	0.00
15428	0.12990	-0.75000E-01	2.5000	0.00	0.00	0.00

图 15-29 NLIST 节点列表

（2）绘制节点 15424 在 Y 方向的位移—时间曲线。

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Define Variables 菜单命令，弹出 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result 单选按钮，如图 15-30 所示，单击 OK 按钮，弹出 Define Nodal Data 节点拾取对话框，在文本框中输入 15424，单击 OK 按钮，弹出 Define Nodal Data 对话框，NVAR 项默认为 2，NODE 项默认为 15424，Item,Comp Data item 项选中 DOF solution 和 Translation UY，如图 15-31 所示，单击 OK 按钮结束。

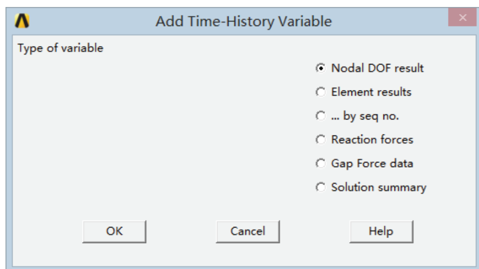


图 15-30 Add Time-History Variable 对话框

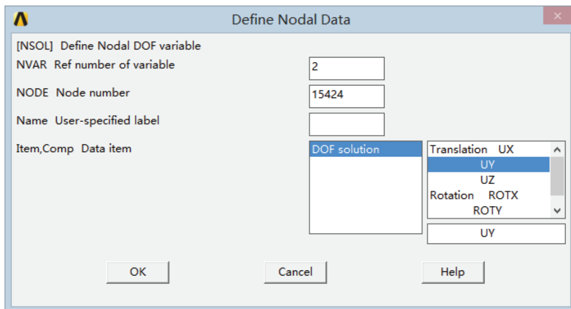


图 15-31 Define Nodal Data 对话框

提示：此时设置的变量编号为 2，节点 15424 的 Y 方向的位移，设置的名称是 uy2。

（3）绘制节点 15424 在 X 方向的位移—时间曲线。

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Define Variables 菜单命令，弹出 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result，单击 OK 按钮，弹出 Define Nodal Data 节点拾取对话框，在文本框中输入 15424，单击 OK 按钮，弹出 Define Nodal Data 对话框，NVAR 项默认为 3，NODE 项默认为 15424，Item,Comp Data Item 项选中 DOF solution 和 Translation UX，单击 OK 按钮结束。

（4）绘制曲线。

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Graph Variables 菜单命令，弹出 Graph Time-History Variables 对话框，依次输入 2 和 3，如图 15-32 所示，单击 OK 按钮，所绘制的曲线如图 15-33 所示。

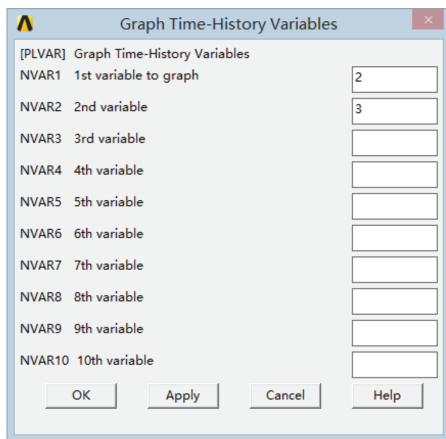


图 15-32　Graph Time-History Variables 对话框

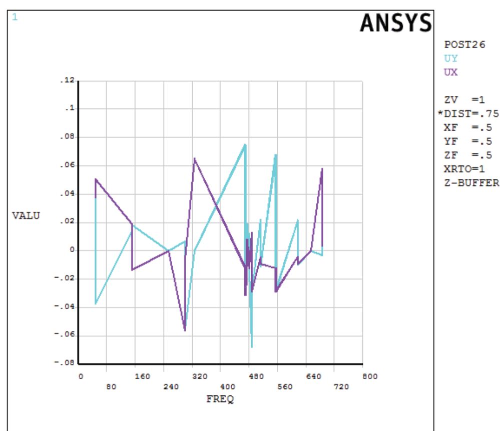


图 15-33　绘制曲线图

（5）查看临界时间的总位移分布云图。由图 15-33 可以看出，位移最大值出现在时间 480 s，在通用后处理器中查看位移分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→By Time/Freq 菜单命令，弹出 Read Results by Time or Frequency 对话框，TIME 项设为 480，如图 15-34 所示，单击 OK 按钮。

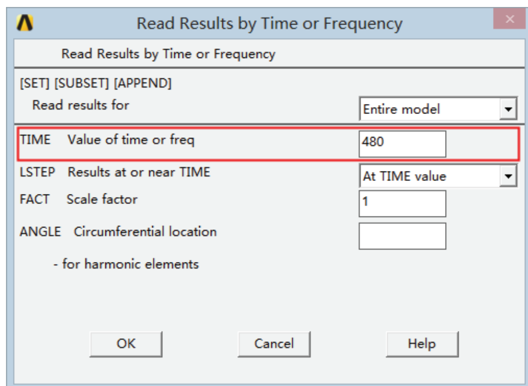


图 15-34　Read Results by Time or Frequency 对话框

显示总位移分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum，单击 OK 按钮，显示总位移分布云图，如图 15-35 所示。

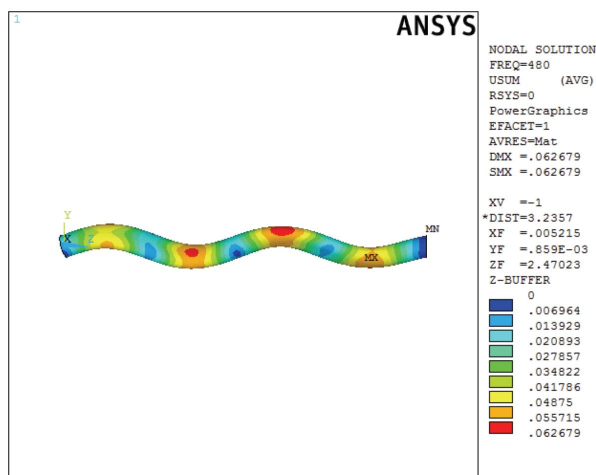


图 15-35　总位移分布云图

由图可以看出，最大总位移为 0.062679，云图的显示是为了更好地说明哪个区域变形严重，不能据此判定应查看具体数值。

10．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

15.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise15-1
/PREP7
CYL4,0,0,0.3/2, ,0.27/2, ,5
MP,EX,1,2E11
MP,PRXY,1,0.2
MP,DENS,1,7800
ET,1,SOLID186
ESIZE,0.04
VATT,       1, ,    1,       0
VSWEEP,ALL
DA,2,ALL,
ASEL,S,,,1
NSLA,S,1
D,ALL, , , , ,UX,UY, , ,
F,ALL,FZ,4.2E3
```



```
ALLSEL,ALL
/SOLU
SOLVE
SAVE
FINISH
/SOLU
ANTYPE,2
MODOPT,LANB,25
EQSLV,SPAR
MXPAND,25, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,1
MODOPT,LANB,25,0,0, ,OFF
SOLVE
/POST1
SET,LIST
FINISH
/SOLU
ANTYPE,4
TRNOPT,MSUP, , , ,0
LUMPM,0
TRNOPT,MSUP,0, , ,0
*DIM,F(t),TABLE,4,1,1,time, ,
*SET,F(1,0,1) , 0
*SET,F(2,0,1) , 0.075
*SET,F(2,1,1) , 2000
*SET,F(3,0,1) , 0.095
*SET,F(3,1,1) , 2000
*SET,F(4,0,1) , 0.1
NSEL,S,LOC,Z,2.5
F,All,FX, %F%
TIME,0.1                          !设定终止时间
AUTOTS,1                          !开启自动时间步长
DELTIM,0.003,0.002,0.006,0        !最小，最大时间步长
KBC,0
TSRES,ERASE
OUTPR,BASIC,ALL,
SOLVE
FINISH
/POST26
NSEL,S,LOC,Z,2.5
NLIST,ALL, , , ,NODE,NODE,NODE
NSOL,2,15424,U,Y,
NSOL,3,15424,U,X,
PLVAR,2,3, , , , , , , , ,
/POST1
```

```
SET, , ,1, ,480, ,
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
FINISH
SAVE
/QUIT
```

15.3 实例 2——压力容器瞬态分析

15.3.1 问题描述

在压力容器的设计分析中，压力容器部件设计所关心的是应力沿壁厚的分布规律。由于实际工作时受到的压力不是恒定不变的，受到随时间变化的载荷时压力，容器应该可靠，对此有实际的工程意义。压力容器壁厚的材料参数如下：弹性模量 206×10^{11} Pa，泊松比 0.3，密度 7850 kg/m^3，屈服应力 345 MPa，许用应力 230 MPa。压力容器壁的几何模型和载荷 F(t)如图 15-36 和图 15-37 所示。

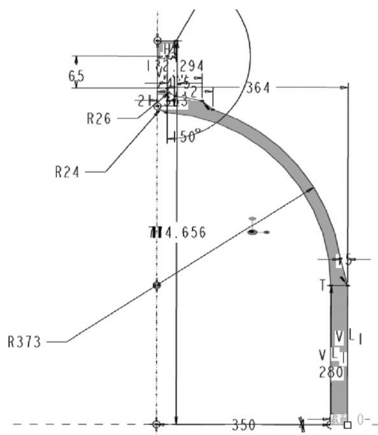


图 15-36　压力容器实体截图

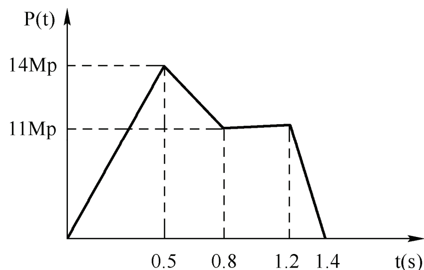


图 15-37　时间压力载荷

15.3.2 问题分析

本问题已经把压力容器简化，只需在容器内壁加载压力，采用完整法求解瞬态问题。其基本步骤：

（1）建立模型（几何模型和有限元模型）。

（2）Full 法求解。

（3）查看结果。

15.3.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise15-2”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Solid 和 Brick 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，单击 OK 按钮。

3．导入模型文件

执行 File→Import→Creo-Parame 菜单命令，在弹出的对话框中选择具体位置。单击 OK 按钮完成导入，导入后的效果如图 15-38 所示，单击 Close 按钮关闭该对话框。



图 15-38 导入几何模型

4．定义材料属性

输入必要参数，包括弹性模量 EX、XY 方向泊松比 PRXY 和质量密度 Dens。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“2.06e8”和“0.3”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“7.85e-6”，单击 OK 按钮。

5．划分网格

（1）定义单元尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Sizes 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 4，如图 15-39 所示，单击 OK 按钮。

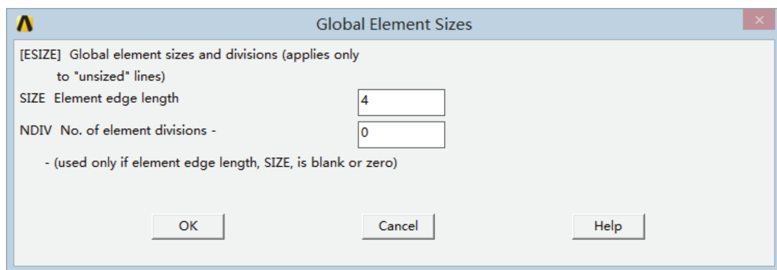


图 15-39 Global Element Sizes 对话框

（2）定义体属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→All Volumes 菜单命令，弹出 Volume Attributes 对话框，保留默认设置，单击 OK 按钮。

（3）划分网格。以扫略方法划分网格可以实现高质量的网格划分，不过这种方法只适用于结构规则的几何形体的划分。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume Sweep→Sweep 菜单命令，弹出体拾取对话框，选取界面中的实体，单击 OK 按钮完成网格划分，其效果如图 15-40 所示。

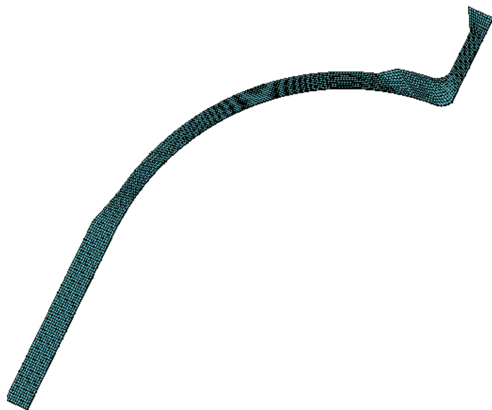


图 15-40 划分网格效果

提示：网格质量的检查。

不好的单元形状会使分析结果不准。因此，ANSYS 程序进行单元检查是要提醒用户网格划分操作是否生成了形状不好的单元。本实例中没有通过的判断网格好坏的准则。简言之，一种单元形状对某种分析可能得不到准确的结果，或另一种分析的结果是完全可以接受的结果，因此必须明白 ANSYS 程序判断形状不好的准则是“武断”的。

出现了上百次单元形状警告信息，也不一定意味着单元的形状会引起不准确的结果。但是，如果没有收到任何形状警告信息，也不一定能够保证得到足够的精度分析的结果。就和有限元许多方面一样，单元的形状好坏也是靠用户自己判断的。复杂结构可能会出现不规则网格单元，读者需要慢慢积累经验。

6．定义边界条件

（1）建立载荷表格。

1）定义表格。执行 Utility Menu→Parameter→Array Parameter→Define/Edit 菜单命令，弹出 Array Parameters 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Add New Array Parameter 对话框，Par 项设为 P(t)，Type 项选中 Table 单选按钮，I,J,K 分别输入 5、1、1，Var1 项设为 time，如图 15-41 所示，单击 OK 按钮。

2）填写表格。在 Array Parameters 对话框中，选中 F(t)项，单击 Edit 按钮，弹出 Table Array 定义对话框，在表格中输入时间—载荷，如图 15-42 所示，完成后按图 15-42 所示执行 File→Apply/Quit 菜单命令。

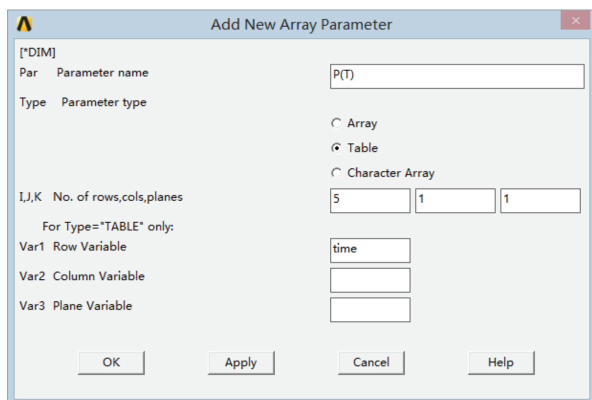


图 15-41 Add New Array Parameter 对话框

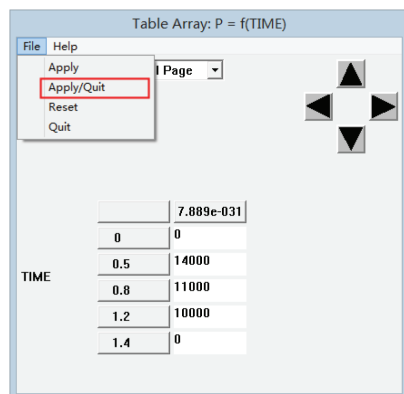


图 15-42 Table Array 定义对话框

（2）施加载荷表格 P(t)。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Pressure→On Areas 菜单命令，弹出 Apply PRES on Areas 对话框，输入“19,20”，如图 15-43 所示，单击 OK 按钮，弹出 Apply PRES on areas 对话框，SFA 项选择 Existing table，如图 15-44 所示，单击 OK 按钮，在弹出的对话框的 Existing table 列表框中选中 P 项，如图 15-45 所示，单击 OK 按钮结束。

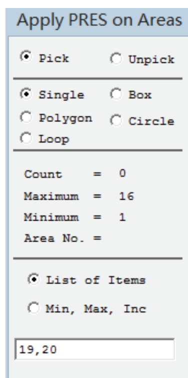


图 15-43 Apply PRES on Areas 对话框

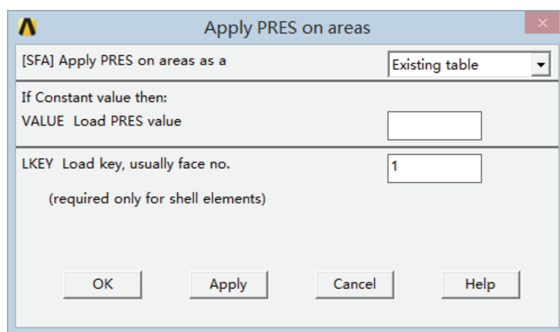


图 15-44 施加表载荷选项

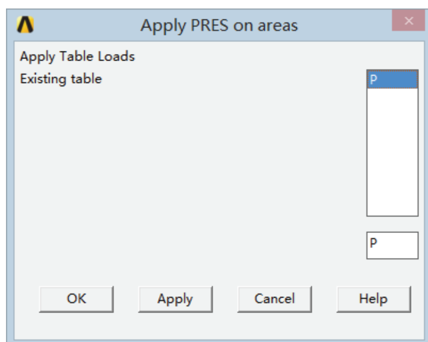


图 15-45 选取表载荷 P

（3）定义约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，输入“18,22”，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 All DOF 项，如图 15-46 所示，单击 OK 按钮，定义约束的面为图 15-47 所示的端面。

提示：对于施加在节点或面上的载荷，ANSYS 程序都会将其转化成施加到节点上进行求解。

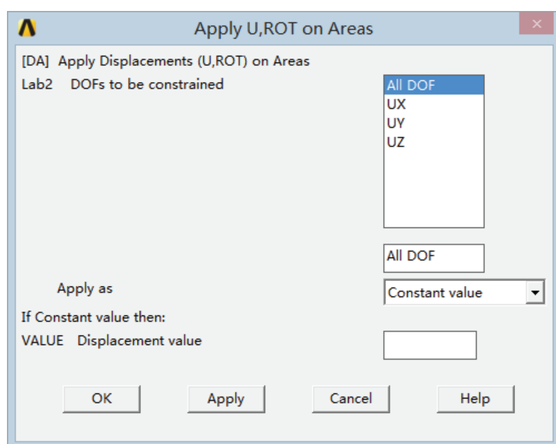


图 15-46 Apply U,ROT on Areas 对话框

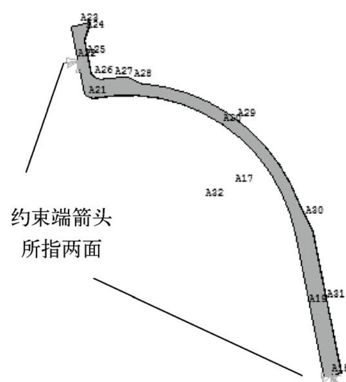


图 15-47 约束端位置

7．设置分析项目

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient 单选按钮，单击 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，选中 Full 单选按钮，即选择完整法，如图 15-48 所示，单击 OK 按钮。

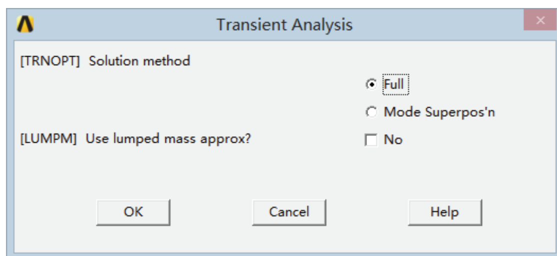


图 15-48 Transient Analysis 对话框

8．积分步长设置

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，选中 Basic 选项卡，在 Analysis Options 选项组中选择 Small Displacement Transient 小变形，在 Time at end of loads tep 文本框中填入截止时间 1.4。打开自动时间步长，即在 Automatic time stepping 下拉列表框中选择 On，在右下方的 Frequency 下拉列表框中选择 Write every sub step，写入每个载荷步结果，如图 15-49 所示。

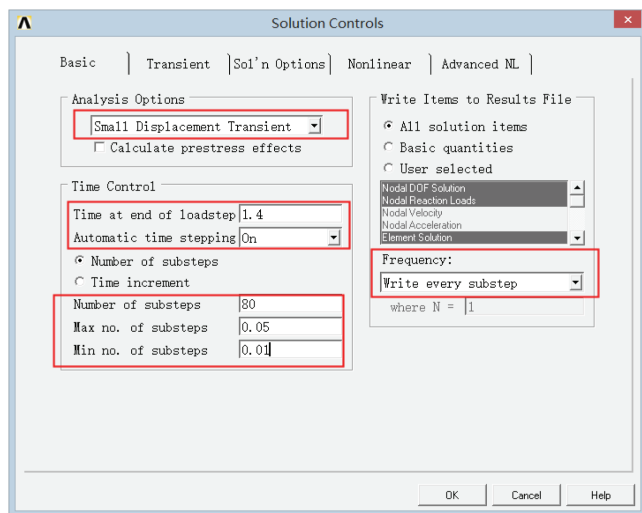


图 15-49 设置积分步长

9．计算求解

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。当出现 Note 提示框时，表示求解结束。执行 UtilityMenu→File→Save AS 菜单命令，将文件另存为适当的位置。

10．后处理

（1）查看点 7239 在 X 方向的位移—时间曲线。

建立参数变量。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Define Variables 菜单命令，弹出 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result，单击 OK 按钮，弹出 Define Nodal Data 节点拾取对话框，在文本框中输入 7239，单击 OK 按钮，弹出 Define Nodal Data 对话框， NVAR 项默认为 2，NODE 项默认为 7239，Item,Comp Data Item 项选中 DOF solution 和 Translation UX，如图 15-50 所示，单击 OK 按钮结束。

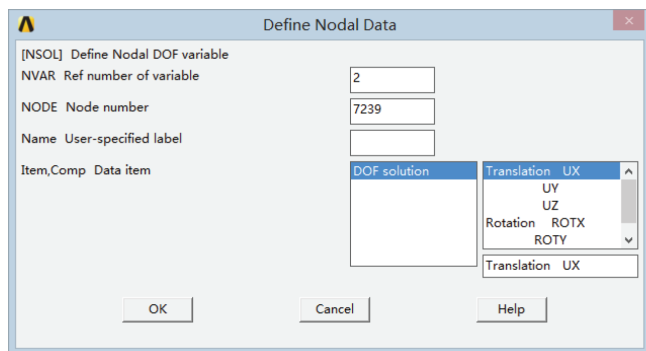


图 15-50 Define Nodal Data 对话框

显示位移时间曲线。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Graph Variables 菜单命令，弹出 Graph Time-History Variables 对话框，输入“2”，单击 OK 按钮，所绘制的曲线如图 15-51

所示。

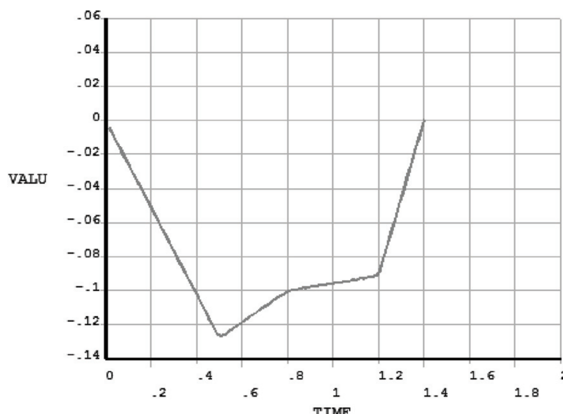


图 15-51　位移时间曲线

由图可以看出，结构的位移响应与时间载荷 P(t)的变化大体一致，没有激振等现象的发生，时间载荷的尖峰出现在 0.5 s 时刻，通过上图和结果列表可以知道结构位移的响应尖峰出现在 0.5075 s 时刻，可以基本判定本分析的结果符合实际情况，可以进行下一步具体的分析，即指定时刻内的载荷结构响应的结果。

（2）查看列表结果。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→List Variables 菜单命令，弹出 List Time-History Variables 对话框，NVAR1 项设为 2，如图 15-52 所示，单击 OK 按钮，列表 7239 号节点在 X 方向上的位移随时间的变化如图 15-53 所示。

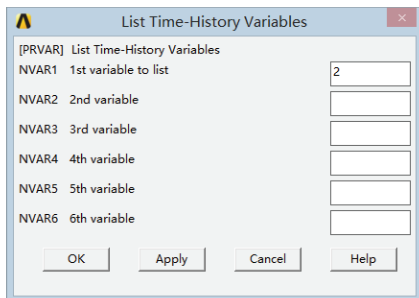


图 15-52　输入变量号

PRVAR Command

File

TIME	7239 UX UX
0.36750	-0.936275E-01
0.38500	-0.987571E-01
0.40250	-0.102588
0.42000	-0.107690
0.43750	-0.111555
0.45500	-0.116616
0.47250	-0.120529
0.49000	-0.125535
0.50750	-0.126925
0.52500	-0.125764
0.54250	-0.123753
0.56000	-0.122542
0.57750	-0.120585
0.59500	-0.119316
0.61250	-0.117421
0.63000	-0.116086

图 15-53　时间位移数据列表

提示：可以将关心的节点随时间载荷响应的结果导出再进一步地处理，一般选用 MATLAB 等数学软件绘制曲线图谱等进行相关研究。

（3）读取指定时间的载荷结果。

由图 15-51 和图 15-53 可知，时间为 0.5075 s 的位移最大，因此可以在通用后处理器中查看 0.5075 s 的结果。执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→By Time/Freq 菜单

命令，弹出 Read Results by Time or Frequency 对话框，TIME 项设为 0.5075，如图 15-54 所示，单击 OK 按钮。

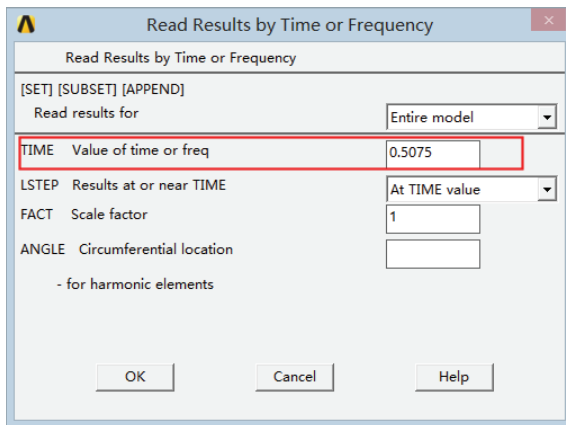


图 15-54 Read Results by Time or Frequency 对话框

查看结果的等效应力云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中 Nodal Solution→Stress→Von Mises Stress，单击 OK 按钮，显示的等效应力分布云图如图 15-55 所示。

查看结果的总位移分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Date 对话框，依次选中 Nodal Solution→DOF Solution→Displacement vector sum，单击 OK 按钮，显示的总位移分布云图如图 15-56 所示。

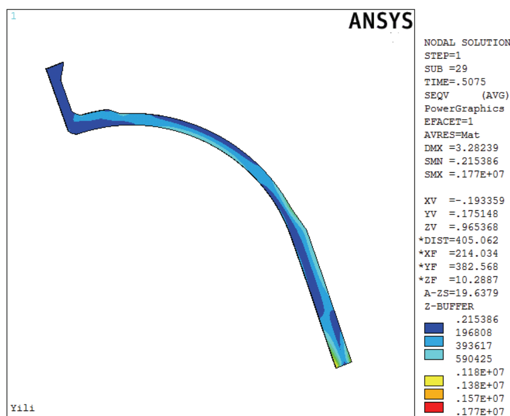


图 15-55 等效应力分布云图

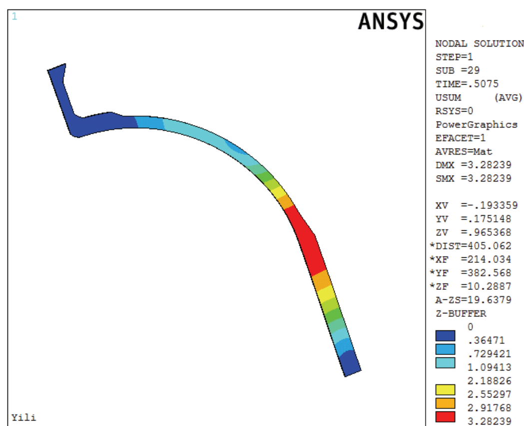


图 15-56 总位移分布云图

由总位移分布云图和等效应力云图可以看出，最大合位移为 3.202 39 mm，产生的最大等效应力为 177 MPa。从总体看，位移分布云图，颜色重的部分（位移大的区域）比较集中，设计时可以适当采取措施；从应力分布云图可以看出，应力较大处分布均匀，最值出现在根部约束端，符合力学知识。

11．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

15.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise15-2
/PREP7
ET,1,SOLID186
MP,EX,1,2.06e8
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7.85e-6
ESIZE,4
VATT,          1, ,    1,          0
VSWEEP,ALL
*DIM,P(T),TABLE,5,1,1,time, ,
*SET,P(1,0,1) , 0
*SET,P(2,0,1) , 0.5
*SET,P(2,1,1) , 14000
*SET,P(3,0,1) , 0.8
*SET,P(3,1,1) , 11000
*SET,P(4,0,1) , 1.2
*SET,P(4,1,1) , 10000
*SET,P(5,0,1) , 1.4
ASEL,S,,,19,20
SFA,All,1,PRES, %P%
ASEL,S,,,18,22,4
DA,All,ALL,
/SOLU
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
NLGEOM,0
NSUBST,80,0.05,0.01
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
TIME,1.4
SOLVE
FINISH
/POST26
FILE,'file','rst','.'
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
```

```
FILLDATA,191,,,,1,1
REALVAR,191,191
NSOL,2,7239,U,X,
PLVAR,2, , , , , , , , , ,
PRVAR,2, , , , , ,
/POST1
SET, , ,1, ,0.5075, ,
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
FINISH
SAVE
/QUIT
```

15.4 本章小结

本章主要讲解了瞬态分析的基本原理、运动方程求解方法以及瞬态分析关键技术时间步长的选取准则等，接着通过两个工程实例，包括冲击载荷作用下的管道和压力容器瞬态分析，详细介绍了结构瞬态分析的操作流程。

第 16 章 谐响应分析与谱分析

本章将介绍谐响应分析和谱分析的模态叠加法的基本原理、分析步骤和计算实例，重点讲解完整法求解谐响应分析和谱分析的计算实例。通过本章的学习，读者可以了解求解此类问题的基本原理，熟练掌握分析过程，能够基本处理有关的实际问题。

学习目标：

（1）了解谐响应分析和谱分析的原理；

（2）了解谐响应分析和谱分析的求解方法特点；

（3）通过实例练习掌握分析过程。

16.1 概述

本节主要讲解谐响应分析和谱分析的定义以及在工程方面的应用，使读者对这两个分析有一个概括性的认识。

16.1.1 谐响应分析的定义与应用

任何连续的周期载荷将在结构系统中产生连续的周期响应（谐响应）。谐响应分析是用于确定线性结构在承受随时间按正弦函数规律变化的载荷时的稳态响应的一种技术。

分析的目的是计算出结构在几种频率下的响应并得到一些响应值（通常是位移）对频率的曲线。从这些曲线上可以找到峰值响应，并进一步观察峰值频率对应的应力。该技术只计算结构的稳态受迫振动，而不考虑发生在激振开始时的瞬态振动，如图 16-1 所示。

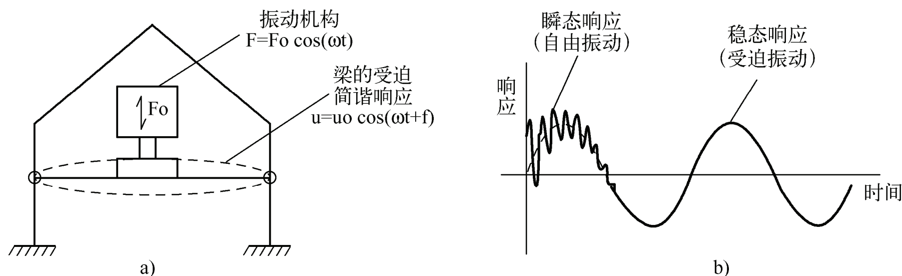


图 16-1 典型谐响应系统和结构谐响应动力学

a) 典型的谐响应系统 b) 结构的瞬态和稳态动力学响应

谐响应分析使设计人员能够预测结构的持续动力特性，从而使设计人员能够验证其设计能否成功地克服共振、疲劳，以及其他受迫振动引起的有害效果。

16.1.2 谱分析的定义与应用

谱分析是一种将模态分析的结果与一个已知的谱联系起来计算模型的位移和应力的

分析技术。谱分析代替时间历程分析（瞬态分析），主要用于确定结构对随机载荷或随时间变化载荷（如地震、风载荷、海洋波浪、喷漆发动机推力、火箭发动机振动等等）的动力响应情况。

16.2 谐响应分析

本节讲解谐响应分析的描述和基本理论，以及求解简谐运动方程的方法及特点和优缺点比较，为进行谐响应分析做准备。

谐响应分析是确定简谐载荷作用下的结构响应。它是一种线性分析，具有质量、常阻尼和常刚度矩阵。任何非线性特征，即使定义了，也会被忽略；但是在分析中可以出现非对称矩阵、流—固耦合、热结构耦合等。谐响应分析也可以包含有预应力结构问题，如钢琴的琴弦。

运动方程：

$$\boldsymbol{M}\ddot{U} + \boldsymbol{C}\dot{U} + \boldsymbol{K}U = F(t) \qquad (16\text{-}1)$$

力和位移是简谐的，频率为圆频率 ω，则

$$U = U_{\max} e^{i\phi} e^{i\omega t} \qquad (16\text{-}2)$$

$$F = F_{\max} e^{i\psi} e^{i\omega t} \qquad (16\text{-}3)$$

式中，$U_{\max}$ 为位移幅值；$F_{\max}$ 为力幅值；ϕ 为角位移相位；ψ 为力相位（弧度）。式（16-2）和式（16-3）可以写成：

$$U = (U_1 + iU_2) e^{i\omega t} \qquad (16\text{-}4)$$

$$F = (F_1 + iF_2) e^{i\omega t} \qquad (16\text{-}5)$$

其中，实部：$U_1 = U_{\max}\cos\phi$，$F_1 = F_{\max}\cos\psi$；虚部：$U_2 = U_{\max}\sin\phi$，$F_2 = F_{\max}\sin\psi$，如图 16-2 所示。

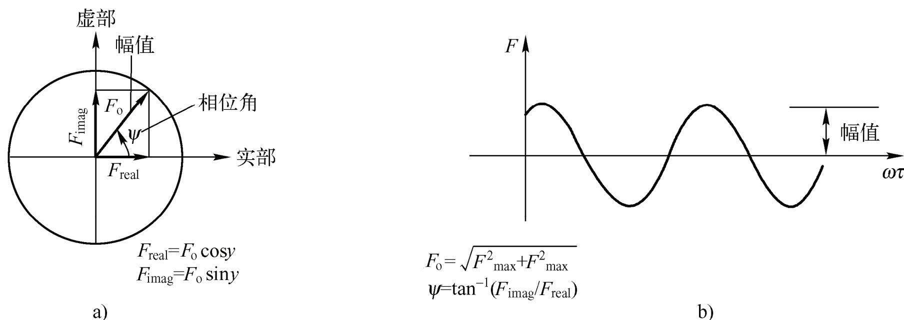


图 16-2 实部虚部与振动分量和振幅相位角的关系

a) 图形显示 b) 坐标显示

将式（16-4）和式（16-5）代入到式（16-1）中，可以得到谐响应分析的运动方程：

$$\left[\boldsymbol{K}\right]-\omega^2\left[\boldsymbol{M}\right]+\mathrm{i}\omega\left[\boldsymbol{C}\right](\left\{U_1\right\}+\mathrm{i}\left\{U_2\right\})=\left\{F_1\right\}+\mathrm{i}\left\{F_2\right\} \quad (16\text{-}6)$$

求解简谐运动方程的以下 3 种方法。

1．完整法

- 完整法为默认方法，是最容易的方法。
- 完整法使用完整的结构矩阵，且允许非对称矩阵（例如：声学矩阵）。

2．缩减法

- 缩减法使用缩减矩阵，比完整法更快。
- 缩减法需要选择主自由度，根据主自由度得到近似的[***M***]矩阵和[***C***]矩阵。

3．模态叠加法

- 从前面的模态分析中得到各模态，再求乘以系数的各模态之和。
- 这是所有求解方法中最快的。

求解简谐运动方程的 3 种方法的比较见表 16-1 所示。

表 16-1　3 种方法的比较

	完　整　法	缩　减　法	模态叠加法
相对求解时间	慢	较快	最快
使用难易程度	最容易	较容易	难
允许元素载荷否	允许	不允许	允许
允许非零位移否	允许	允许	不允许
允许模态阻尼	不允许	不允许	允许
预应力	不能	能	能
能否进行 Restar	能	能	不能

3 种方法的共同局限性如下。

- 所有载荷必须随时间按正弦变化。
- 所有载荷必须有相同频率。
- 不允许有非线性特性。
- 不计算瞬态效应。

用户可以通过瞬态动力学分析来克服这些局限，这时应将简谐载荷表示为有时间历程的载荷函数。

16.3　实例 1——“工作台—电动机”系统谐响应分析

16.3.1 问题描述

图 16-3 所示为“工作台—电动机”系统。当电动机工作时，由于转子偏心引起电动机发生简谐运动，这时电动机的旋转偏心载荷是一个简谐激振，计算系统在该载荷激励下的结

构响应。要求计算频率间隔为 10/10=1 Hz 的所有解，以得到满意的响应曲线，并用 POST26 时间-历程后处理器绘制幅值与频率的关系曲线。已知条件如下。

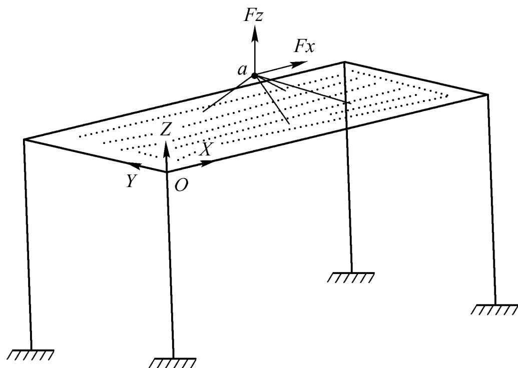


图 16-3 质量块与板梁载荷示意图

电机质量：*M*=100 kg；

简谐激励：*Fx*=100 N，*Fz*=100 N，*Fz* 与 *Fx* 相差 90° 相位；

频率范围：0～10 Hz；

材料特性：弹性模量 2×10^{11} Pa，泊松比 0.3，密度 7.8×10^{3} kg/m^3；

工作台：厚度 0.02 m，长 2 m，宽 1 m。

工作台 4 条腿的几何特性如下。

截面面积：0.02 m×0.02 m，梁高 1 m。

16.3.2 问题分析

本实例属于典型的谐响应分析，模型比较简单，所以直接采用 ANSYS 的前处理器完成模型的建立，选用 SHELL181 模拟工作台，选用 BEAM189 模拟工作台的 4 条腿，选用 MASS21 模拟电动机。采用国际单位制。

16.3.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise16-1”，单击 OK 按钮。

2．定义材料属性

（1）定义弹性模量和泊松比。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Structural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“2e11”和“0.3”，单击 OK 按钮。

（2）定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“7.8e3”，单击 OK 按钮。

3．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的

Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Shell 和 4node 181，4 节点 SHELL181 单元，如图 16-4 所示，单击 OK 按钮。

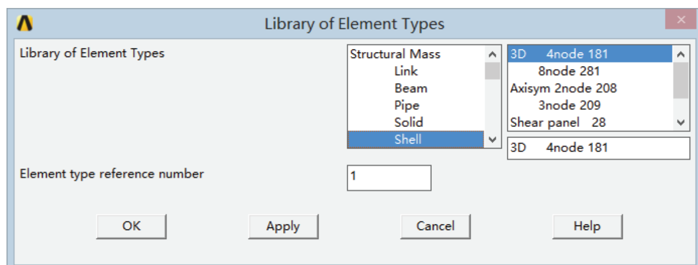


图 16-4　SHELL181 单元定义

继续单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Mass 和 3D mass 21，质量单元 MASS21 单元，如图 16-5 所示，单击 OK 按钮。

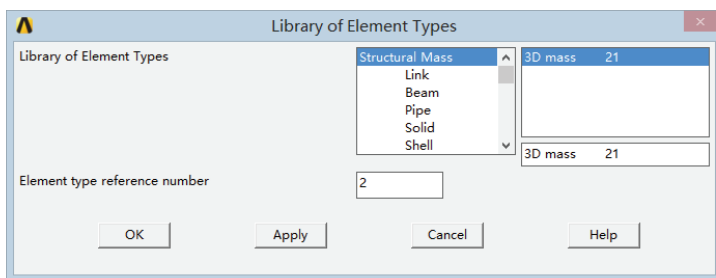


图 16-5　MASS21 单元定义

继续单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Beam 和 3 node 189，3 节点 BEAM189 单元，如图 16-6 所示，单击 OK 按钮。

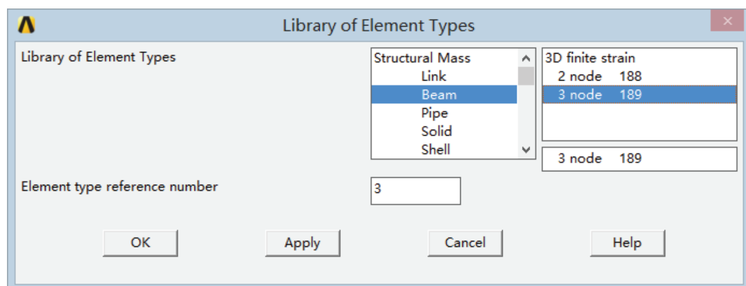


图 16-6　BEAM189 单元定义

4．定义质量单元的质量，即电机的质量

执行 Main Menu→Preprocessor→Real Constants→Add/Edit/Delete 菜单命令，弹出 Real Constant Set Number1，for MASS21 对话框，单击 Add 按钮，弹出单元类型选择对话框，选中 Type 2 MASS21 项，单击 OK 按钮，弹出实常数设置对话框，设置 MASS Z 项为 100，如图 16-7 所示，单击 OK 按钮，再单击 Close 按钮。

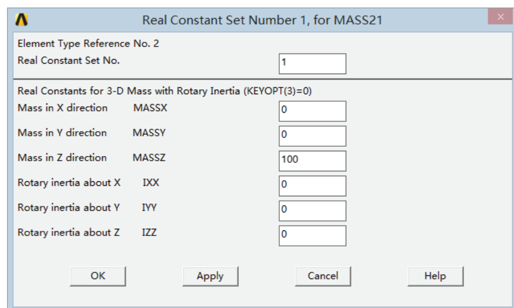


图 16-7 Real Constant Set Number1，for MASS21 对话框

5．设置单元特性

（1）设置梁单元截面。执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Beam→Common Sections 菜单命令，弹出 Beam Tool 对话框，选中正方形截面，B、H 项均设为 0.02，定义名称 Be01，如图 16-8 所示，单击 OK 按钮。

（2）设置壳单元厚度。执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Shell→Lay-up→Add/Edit 菜单命令，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框，Thickness 项设为 0.002，Name 项设为 Shell02，其他项保留默认设置，如图 16-9 所示，单击 OK 按钮。

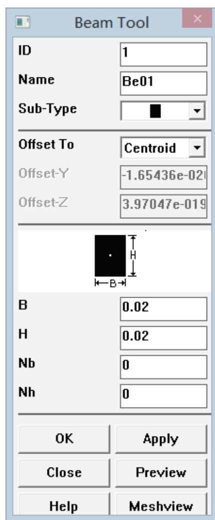


图 16-8 Beam Tool 对话框

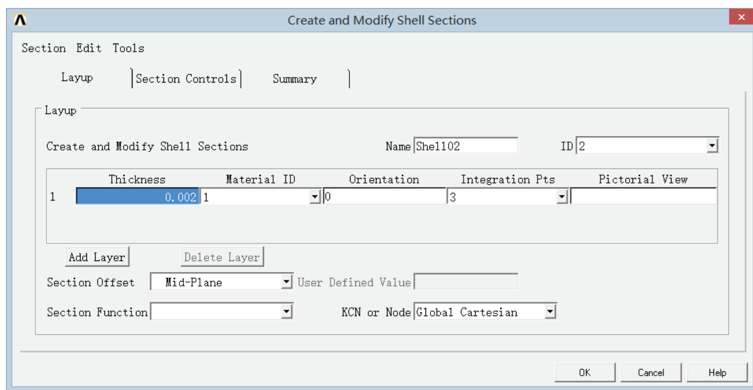


图 16-9 Create and Modify Shell Sections 对话框

6．建立几何模型

（1）建立关键点。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 菜单命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，KPT 项设为编号 1，输入坐标值（0,0,0），单击 Apply 按钮，再依次建立 2、3、4 号关键点（2,0,0）（2,1,0）（0,1,0），用于创建支撑面；继续创建 5、6、7、8 号关键点（0,0,1.0）（2,0,1.0）（0,1,1.0）（2,1,1.0），用于创建支撑梁。

（2）由关键点创建面。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，依次输入“1,2,3,4”，单击 OK

按钮。

（3）由关键点创建直线。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Lines→Straight line 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“1,5”，单击 Apply 按钮，再依次输入（2,6）（3,7）（4,8），最后单击 OK 按钮退出对话框。

（4）查看效果。执行 PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，KP 和 LINE 项设为 on，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Plot→Lines 菜单命令，显示线的效果如图 16-10 所示。

7．划分网格

（1）定义划分单元尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Sizes 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，输入“0.05”，如图 16-11 所示，单击 OK 按钮。

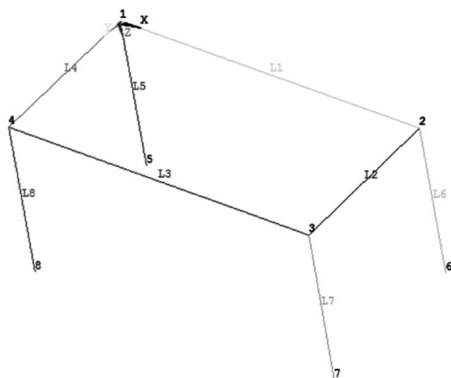


图 16-10　建立的几何模型

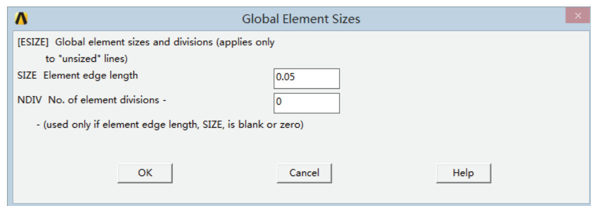


图 16-11　Global Element Sizes 对话框

（2）划分壳单元。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 1 号面，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 1 号材料，TYPE 项选中 1 SHELL181，SECT 项选择 2 Shell02，如图 16-12 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→By Corners 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 1 号面，单击 OK 按钮，弹出关键点拾取对话框，依次拾取 1、2、3、4 号面，即完成网格划分。

（3）划分线单元。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，依次拾取 5、6、7、8 号线，单击 OK 按钮。弹出 Line Attributes 对话框，MAT 项选中 1 号材料，TYPE 项选中 3 BEAM189，SECT 项选择 1 Be01，如图 16-13 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，依次拾取 5、6、7、8 四条线，单击 OK 按钮，即完成线网格划分。

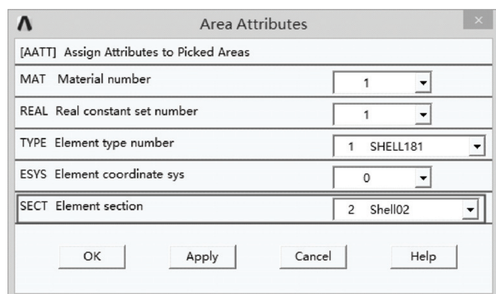


图 16-12　Area Attributes 对话框

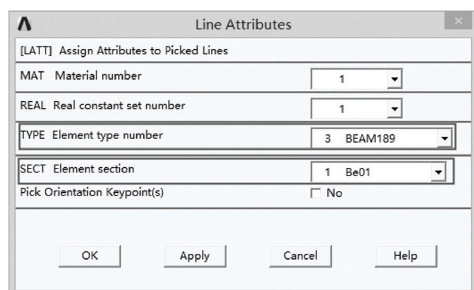


图 16-13　Line Attributes 对话框

（4）显示单元形状查看效果。

执行 Main Menu→PlotCtrl→Style→Size and Shape 菜单命令，弹出 Size and Shape 对话框，/ESHAPE 项选为 ON，单击 OK 按钮。网格划分的效果如图 16-14 所示。

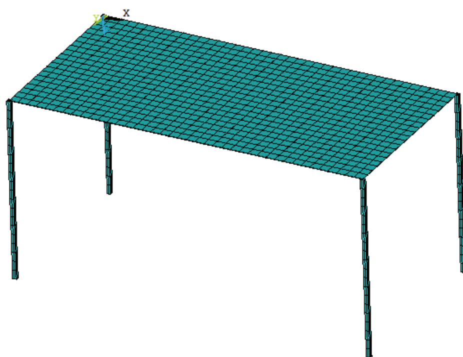


图 16-14　网格划分效果图

8．添加质量单元模拟电动机

（1）生成节点。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Node→In Actice CS 菜单命令，弹出 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框，NODE 项设为 1500，X,Y,Z 项依次输入 1、0.55、-0.1，如图 16-15 所示，单击 OK 按钮。

（2）定义单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Element→Elem Attributes 菜单命令，弹出 Element Attributes 对话框，TYPE 项设为 2 Mass21，REAL 项设为 1，如图 16-16 所示，单击 OK 按钮。

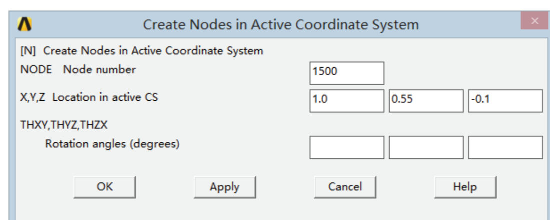


图 16-15　创建节点

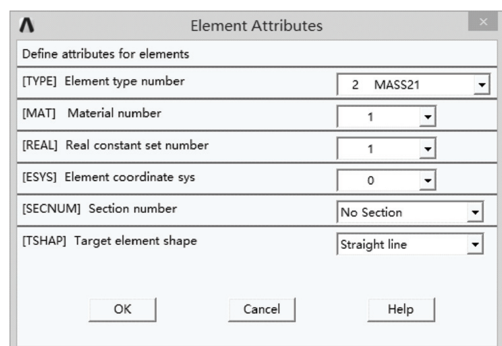


图 16-16　选取质量单元

（3）创建质点单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Element→Auto Numbered→Thru Node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，在节点拾取对话框中输入“1500”，单击 OK 按钮。

（4）生成刚性区。执行 Main Menu→Preprocessor→Couping/Ceqn→Rigid Region 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“1500”，单击 Apply 按钮。再在节点拾取对话框中依次拾取节点 472、473、474、491、492、493、510、511、512，位置如图 16-17 所示，单击 OK 按钮。

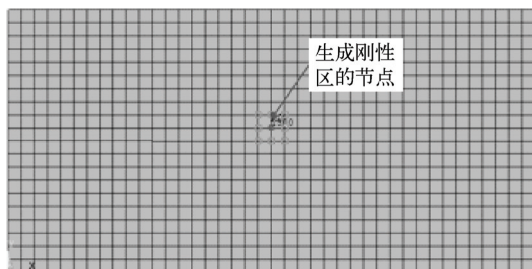


图 16-17　刚性区选取节点示意图

弹出 Constraint Equation for Rigid Region 对话框，在 Ldof 项选择 All applicable，如图 16-18 所示，单击 OK 按钮。耦合效果如图 16-19 所示。

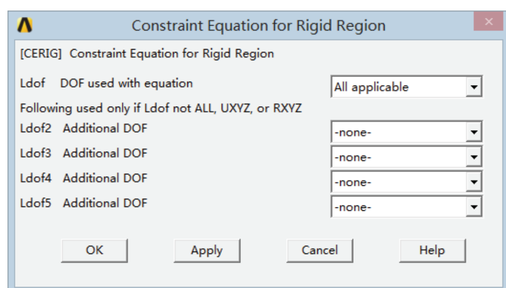


图 16-18　Constraint Equation for Rigid Region 对话框

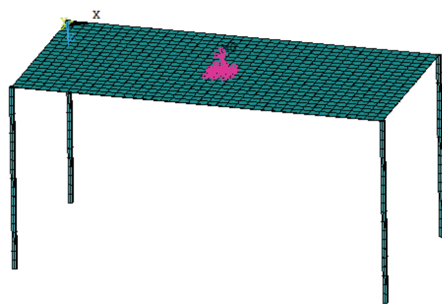


图 16-19　完成耦合区域效果图

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

9．施加约束条件，约束 4 条梁的支撑点

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→On Keypoints 菜单命令，弹出节点拾取对话框，依次输入“5,6,7,8”，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on KPs 对话框，选择 All DOF 项，单击 OK 按钮。

10．定义分析类型并选择求解方法

（1）定义谐响应分析。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Harmonic 单选按钮，即选择谐响应分析，如图 16-20 所示，单击 OK 按钮。

（2）选择谐响应求解方法。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Options Analysis 菜单命令，弹出 Harmonic Analysis 对话框，选择完全法 Full，自由度输出模式选择

Amplitud+phase（幅值和相位），如图 16-21 所示，单击 OK 按钮，弹出 Full Harmonic Analysis 对话框，取默认设置，单击 OK 按钮。

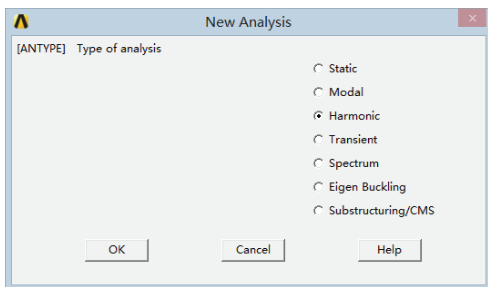


图 16-20　New Analysis 对话框

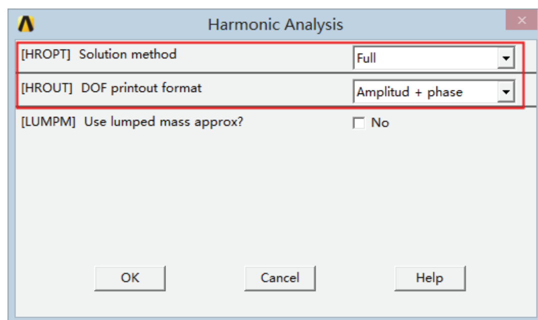


图 16-21　Harmonic Analysis 对话框

（3）设置结果输出模式。执行 Main Menu→Solution→Loads Step Opts→Output Ctrls→Solu Printout 菜单命令，弹出 Solution Printout Controls 对话框，FREQ 项选择 Every substep 单选按钮，如图 16-22 所示，单击 OK 按钮。

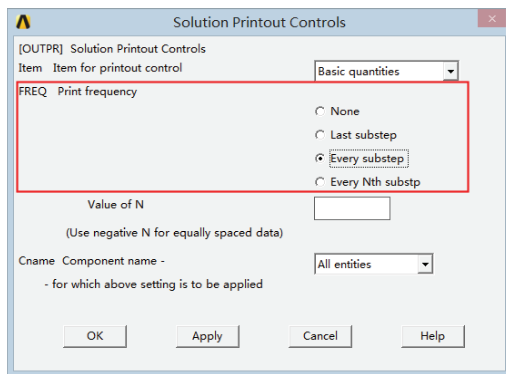


图 16-22　Solution Printout Controls 对话框

11．设定分析频率范围和子步数

执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Time /Frequency→Freq and substeps 菜单命令，弹出 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框，HARFRQ 项设为频率范围 0、10，NSUBST 项设为子步数 10，KBC 项选择 Stepped（阶跃）单选按钮，如图 16-23 所示，单击 OK 按钮。

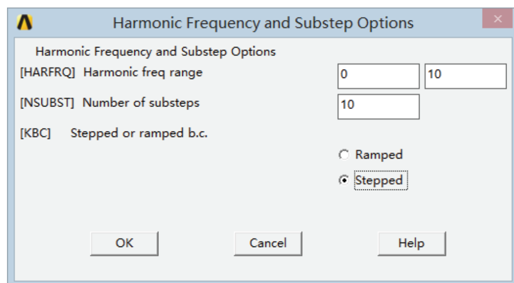


图 16-23　设置频率范围和子步数



12．施加幅值和相位

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Apply→Structural→Force/Moment→On node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，在文本框中输入“1500”，单击 OK 按钮；弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，按照图 16-24 所示设置 FX 方向激振，单击 Apply 按钮；弹出节点拾取对话框，在文本框中输入“1500”，单击 OK 按钮；弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，按照图 16-25 所示设置 FZ 方向激振力，单击 OK 按钮。

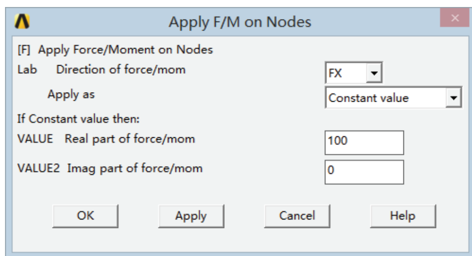


图 16-24　FX 方向激振

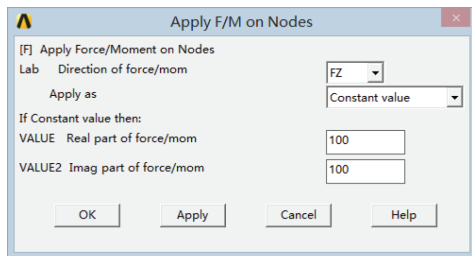


图 16-25　FZ 方向激振

13．计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

14．进行后处理

（1）定义变量节点 1500 的 X，Y，Z 3 个变量。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Define Variables 菜单命令，弹出 Defined Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮；弹出 Add Time-History Variable 对话框，选中 Nodal DOF result，单击 OK 按钮；弹出 Define Nodal Data 节点拾取对话框，在文本框中输入“1500”，单击 OK 按钮；弹出 Define Nodal Data 对话框， NVAR 项默认为 2，NODE 项默认为 1500，Item,Comp Data Item 项选中 DOF solution 和 Translation UX，如图 16-26 所示。依照此方法添加 1500 节点的 UY 和 UZ 两个方向的变量，如图 16-27 所示。

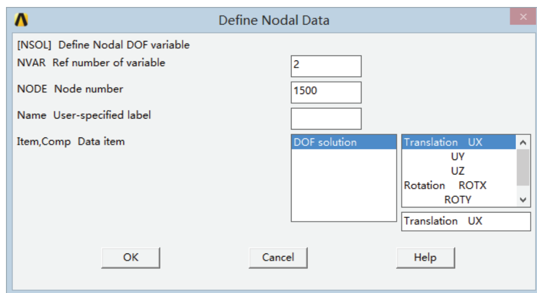


图 16-26　定义变量

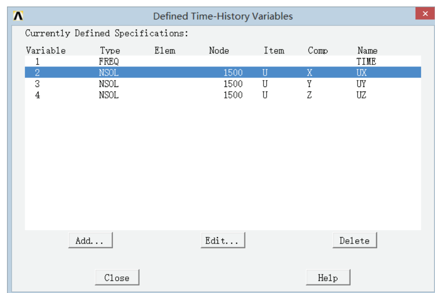


图 16-27　变量列表

（2）输入变量显示振动曲线。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Graph Variables 菜单命令，弹出 Graph Time-History Variables 对话框，依次输入 2、3 和 4，单击 OK 按钮，所绘制的曲线如图 16-28 所示。

（3）采用通用后处理器查看第 5 步结果。由图 16-28 可以看出第 5 步出现峰值，读取第

5 步结果，显示变形图。

1）读取结果。执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→By Time/Freq 菜单命令，弹出 Read Results by Time or Frequency 对话框，TIME 项设为 5，如图 16-29 所示，单击 OK 按钮。

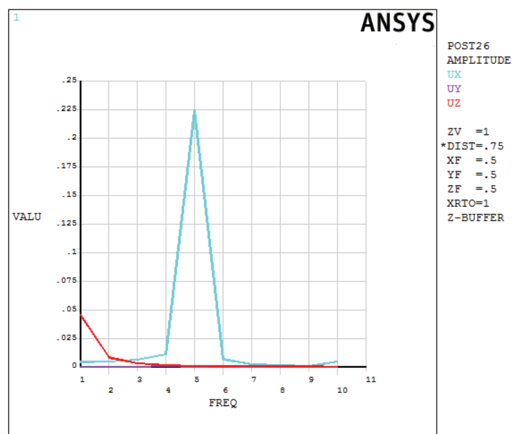


图 16-28 绘制曲线图

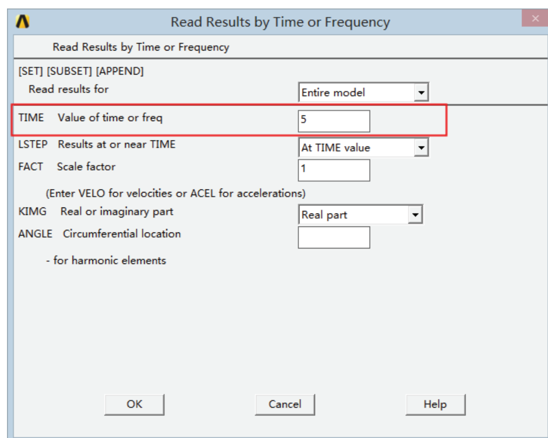


图 16-29 Read Results by Time or Frequency 对话框

2）显示变形图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Deformed Shape 菜单命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选择 Def+undeformed 单选按钮，如图 16-30 所示，单击 OK 按钮结束，显示如图 16-31 所示。

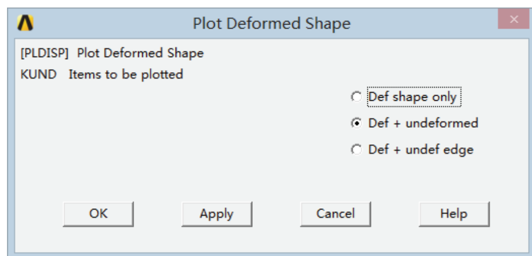


图 16-30 Plot Deformed Shape 对话框

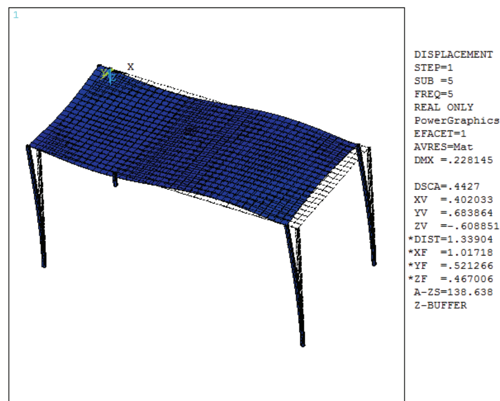


图 16-31 第 5 步结果变形图

15. 保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

16.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
```

```
/FILNAME,Exercise16-1
/PREP7
MP,EX,1,2e11
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7800
ET, 1, Shell181                    !定义壳单元
ET, 2,Mass21                       !定义质量单元
ET, 3, Beam189                     !定义梁单元
R,1,0,0,100,0,0,0,
SECTYPE,    1, BEAM, RECT, Be01, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.02,0.02,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
sect,2,shell,,Shell02
secdata, 0.002,1,0,3
secoffset,MID
seccontrol,0,0,0, 0, 1, 1, 1
K,1,0,0,0,
K,2,2,0,0,
K,3,2,1,0,
K,4,0,1,0,
K,5,0,0,1.0,
K,6,2,0,1.0,
K,7,2,1,1.0,
K,8,0,1,1.0,
A,1,2,3,4
LSTR,       1,       5
LSTR,       2,       6
LSTR,       3,       7
LSTR,       4,       8
ESIZE,0.05,0,
ASEL, S, , ,       1
AATT,       1,       1,    1,       0,    2
AMAP,1,1,2,3,4
LSEL,S,,,5,8,1
LATT,1,1,3, , , ,1
LMESH,ALL
/ESHAPE,1.0
N,1500,1.0,0.55,-0.1,,,,
TYPE,    2
MAT,       1
REAL,       1
ESYS,       0
SECNUM, ,
TSHAP,LINE
E,    1500
FLST,5,9,1,ORDE,6
```



```
FITEM,5,472
FITEM,5,-474
FITEM,5,491
FITEM,5,-493
FITEM,5,510
FITEM,5,-512
CM,_NODECM,NODE
*SET,_z1,        1500
NSEL,S, , ,P51X
NSEL,A, , ,_Z1
CM,_CERGCM,NODE
CMSEL,S,_NODECM
!*
CMSEL,S,_CERGCM
CERIG,1500,ALL,ALL, , , ,
CMSEL,S,_NODECM
/SOLU
KSEL,S,,,5,8,1
DK,ALL, , , ,0,ALL, , , , , ,
ANTYPE,3
HROPT,FULL
HROUT,OFF
LUMPM,0
EQSLV, ,0,
PSTRES,0
OUTPR,BASIC,ALL,
HARFRQ,0,10,
NSUBST,10,
KBC,1
F,1500,FX,100,0
F,1500,FZ,100,100
SOLVE
/POST26
NSOL,2,1500,U,X,
NSOL,3,1500,U,Y,
NSOL,4,1500,U,Z,
PLVAR,2,3,4, , , , , , , ,
/POST1
SET, , ,1,0,5, ,
/DIST,1,1.08222638492,1
/REP,FAST
PLDISP,1
FINISH
SAVE
/QUIT
```

16.4 谱分析

谱分析是一种将模态分析的结果与一个已知的谱联系起来计算模型的位移和应力的分析技术。

谱分析代替时间-历程分析（瞬态分析），主要用于确定结构对随机载荷或随时间变化载荷（如地震、风载荷、海洋波浪、喷漆发动机推力、火箭发动机振动等等）的动力响应情况。

谱是谱值与频率关系的曲线，它反映了时间-历程载荷的强度和频率的信息。ANSYS 的谱分析有以下 3 种。

（1）响应谱分析

■ 单点响应谱（Sing-point Response Spectrum，SPRS）。

■ 多点响应谱（Multi-point Response Spectrum，MPRS）。

（2）动力分析方法（Dynamic Design Analysis Method，DDAM）。

（3）功率谱密度（Power Spectral Densi，PSD）。

1．响应谱分析

一个响应谱代表大自由度系统对一个时间-历程载荷函数的响应，它是一个响应与频率的关系曲线，其中响应可以是位移、速度、加速度、力等。响应谱又分为以下两种。

■ 单点响应谱：在模型的一个点集上定义一条（或一族）响应谱曲线，例如在所有支撑处。

■ 多点响应谱：在模型的多个点集上定义响应谱曲线，如图 16-32 所示。

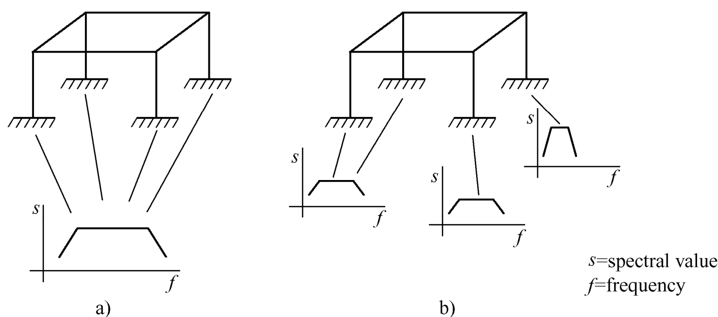


图 16-32 单点和多点响应谱

a) 单点响应谱 b) 多点响应谱

2．功率谱密度

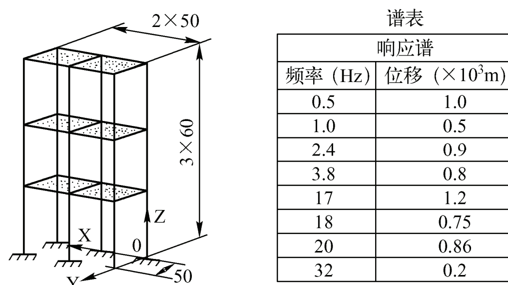
功率谱密度是一种概率统计方法，是针对随机变量均方的度量，一般用于随机振动分析。连续瞬态响应只能通过概率分布函数进行描述，即出现某水平响应所对应的概率。

与响应谱分析相似，随机振动分析也可以是单点和多点的。在单点随机振动分析中，要求在结构的一个点集上指定一个功率密度谱；在多点随机振动分析时，则要求在模型的不同点集上指定不同的功率密度谱。

16.5 实例 2——板梁结构单点地震响应谱分析

16.5.1 问题描述

某板梁结构如图 16-33 所示，计算在 Y 方向的地震位移响应谱作用下的整个结构的响应情况。板梁结构基本尺寸和地震谱如图 16-33 所示，其数据如下。



谱表

响应谱	
频率（Hz）	位移（$\times10^3$m）
0.5	1.0
1.0	0.5
2.4	0.9
3.8	0.8
17	1.2
18	0.75
20	0.86
32	0.2

图 16-33 板梁结构简图

注：左图中单位为 mm。

材料参数：

（1）弹性模量 2e11 Pa，泊松比 0.3，密度 7.8e3 kg/m^3。

（2）板壳厚度 0.002 m，长×宽=50 mm×50 mm。

（3）梁的几何参数。长×宽=4 mm×4 mm，高度为 60 mm。

16.5.2 问题分析

本实例属于典型的单点相应谱分析，其分析主要有以下几个步骤。

（1）建造模型。

（2）获得模态解，先进行模态分析获得模态解，具体步骤见第 14 章。

（3）获得谱解，指定新的分析类型 Spectrum（谱分析），选项为单点 SPRS。

（4）扩展模态，扩展到对谱分析有影响的模态即可。

（5）合并模态，选择合并方法。

（6）观察结果，包括位移、速度、加速度、应力、应变、反力响应等。

该模型比较简单，所以直接采用 ANSYS 的前处理器完成模型的建立，选用 SHELL181 模拟板结构，选用 BEAM189 模拟梁结构。采用国际单位制。

16.5.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入 Exercise “16-2”，单击 OK 按钮。

2．定义材料属性

（1）定义弹性模量和泊松比。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material

Models→Structural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“2e11”和“0.3”，单击 OK 按钮。

（2）定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“7.8e3”，单击 OK 按钮。

3．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Shell 和 4node 181，4 节点 SHELL181 单元，单击 OK 按钮。

继续单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Beam 和 3 node 189，3 节点 BEAM189 单元，单击 OK 按钮。

4．设置单元特性

（1）梁单元截面设置。执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Beam→Common Sections 菜单命令，弹出 Beam Tool 对话框，选中正方形截面，B、H 项均设为 0.004，定义名称为 Be01，如图 16-34 所示，单击 OK 按钮。

（2）壳单元厚度设置。执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Shell→Lay-up→Add/Edit 菜单命令，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框，Thickness 项设为 0.002，Name 项设为 Shell02，其他项保留默认设置，如图 16-35 所示，单击 OK 按钮。

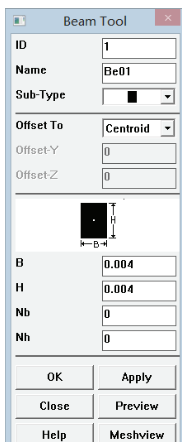


图 16-34　Beam Tool 对话框

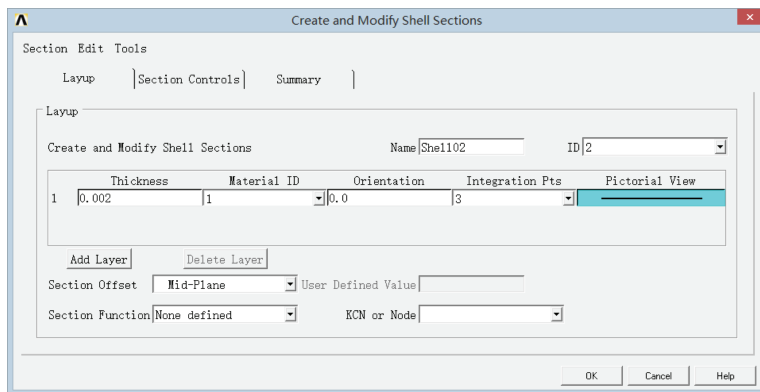


图 16-35　Create and Modify Shell Sections 对话框

5．建立几何模型

（1）建立关键点。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 菜单命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，KPT 项设为 1，输入坐标值（0,0,0），单击 Apply 按钮，再依次建立 2、3、4 号关键点（0.05,0,0）（0.05,0.05,0）（0,0.05,0）。

（2）复制关键点。在 Z 方向复制两组关键点，间隔为 0.05 m。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Keypoints 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Copy Keypoints 对话框，ITIME 项设为 3，DZ 项设为坐标偏移量 0.05，如图 16-36 所示，单击 OK 按钮。

（3）由关键点创建面。首先选取 5、6、7、8 关键点创建平面，再依次选取 9、10、11、12 关键点创建平面。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，依次输入“5,6,7,8”，单击 Apply 按钮，再输入“9,10,11,12”，单击 OK 按钮。由关键点创建面对话框如图 16-37 所示。

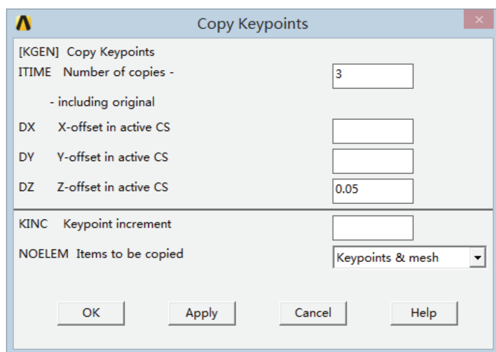


图 16-36 Copy Keypoints 对话框

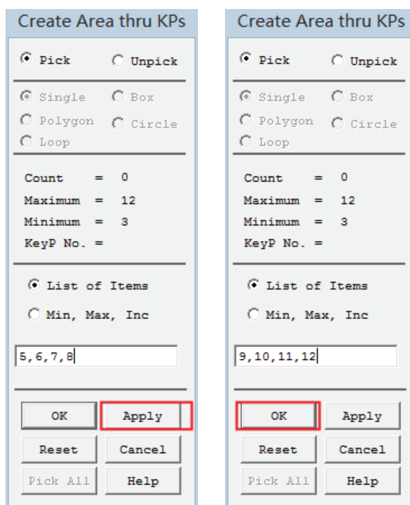


图 16-37 关键点拾取和由关键点创建面

（4）复制平面。首先选择 5、6、7、8 关键点创建的平面进行复制，然后选取 9、10、11、12 关键点创建的平面进行复制。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取关键点 5、6、7、8 创建的面，单击 OK 按钮，弹出 Copy Areas 对话框，ITIME 项默认为 2，符合要求，DY 项设为 0.05，如图 16-38 所示，单击 OK 按钮。再按照相同的方法复制 9、10、11、12 关键点创建的平面。最终效果如图 16-39 所示。

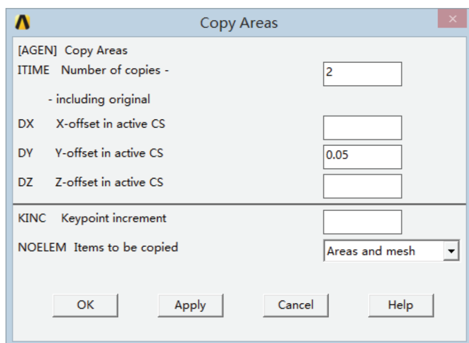


图 16-38 复制平面

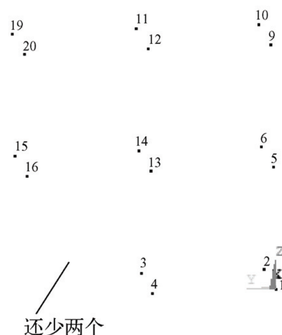


图 16-39 显示关键点

（5）复制关键点。由图 16-39 可以看出，还差两个关键点。选择关键点 3、4，偏移量 DX、DY、DZ 分别为 0、0.05、0。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Keypoints 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，输入“3,4”，单击 OK 按钮，弹出 Copy Keypoints 对话框，ITIME 项设为 2，DY 项设为坐标偏移量 0.05，单击 OK 按钮。

（6）压缩编号。复制平面的时候，产生关键点重合现象，合并编号，便于查看和减少计算。执行 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items 菜单命令，弹出 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，选择 Keypoints 项，如图 16-40 所示，单击 OK 按钮。

（7）由关键点创建直线。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Lines→Straight line 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，依次拾取 Z 方向相邻的两个关键点，最后单击 OK 按钮结束。最后执行 Utility Menu→Plot→Lines 菜单命令，效果如图 16-41 所示。

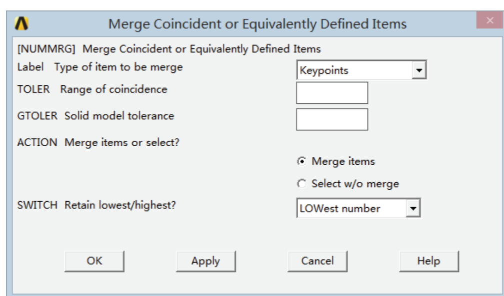


图 16-40 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框

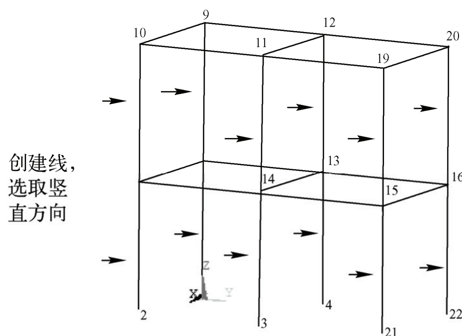


图 16-41 线显示效果图

6．划分网格

（1）设置网格尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 0.002，单击 OK 按钮。

（2）壳单元的划分。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 4 个面，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 1 号材料，TYPE 项选中 1 SHELL181 项，SECT 项选择 2 Shell02，如图 16-42 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→3 or 4 sided 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮，完成网格划分，效果如图 16-43 所示。

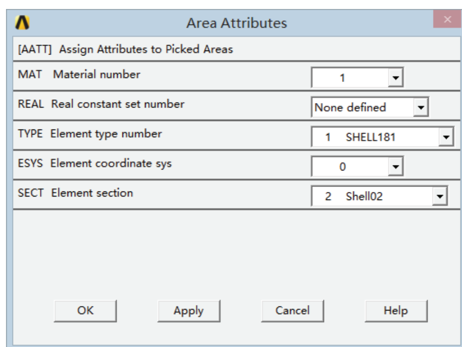


图 16-42 Area Attributes 对话框

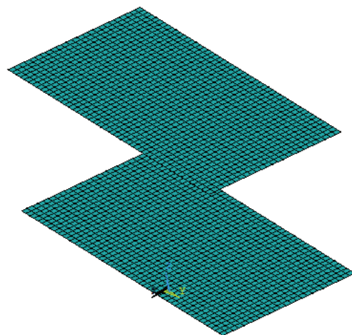


图 16-43 壳单元划分效果

（3）梁单元划分。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，依次拾取 Z 方向的 12 条线，单击 OK 按钮，弹出 Line

Attributes 对话框，MAT 项选中 1 号材料，TYPE 项选中 2 BEAM189 项，SECT 项选择 1 Be01，如图 16-44 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，拾取 Z 方向的 12 条线，单击 OK 按钮，即完成线网格划分，效果如图 16-45 所示。

提示：仅选择 Z 方向的线，可以先选中再进行单元属性和网格的划分。选择方式为：在输入窗口输入“LSEL,U,TAN1,Z”即可选中所有 Z 方向的线。

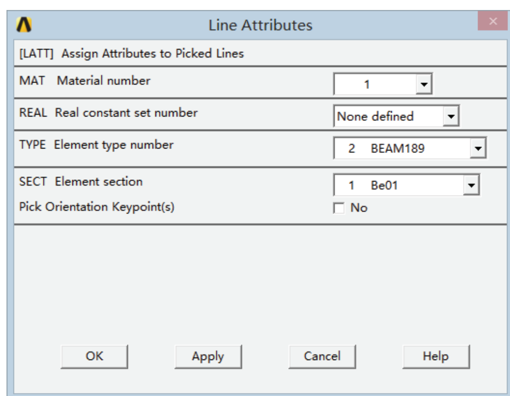


图 16-44 划分单元设置

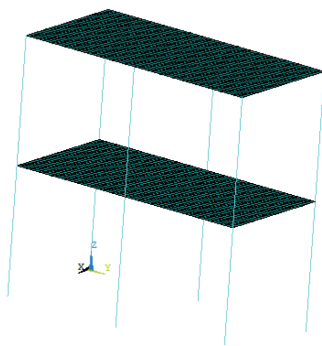


图 16-45 划分完成效果

7. 模态分析

（1）设置分析类型。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，进行求解类型的设置，选中 Modal 单选按钮，单击 OK 按钮。

（2）设置分析选项。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Modal Analysis 对话框，选中 Supernode 单选按钮，No. of modes to extract 项设为 10，如图 16-46 所示，单击 OK 按钮结束。在弹出的对话框中保留默认设置，如图 16-47 所示，单击 OK 按钮。

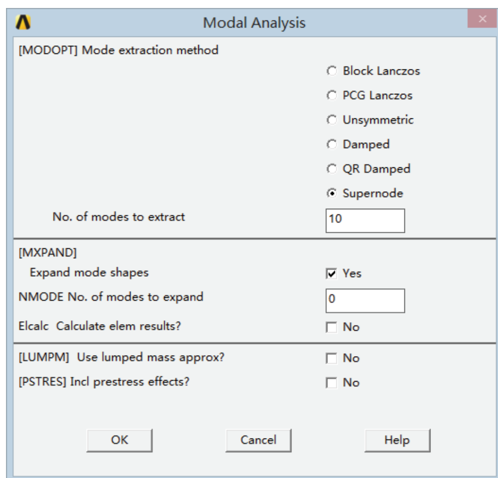


图 16-46 设施项目

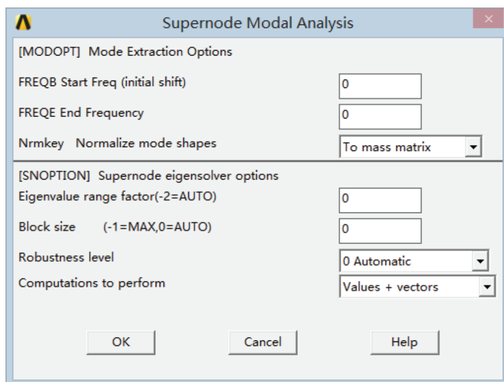


图 16-47 默认设置

（3）添加约束。约束底端 6 个关键点 1、2、3、4、21、22 为全约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→On Keypoints 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入 1、2、3、4、21、22 六个关键点编号，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on KPs 对话框，选择 All DOF 项，单击 OK 按钮。

（4）进行模态计算求解。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

8．谱分析

（1）设置分析类型谱分析。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，进行求解类型的设置，选中 Spectrum 单选按钮，单击 OK 按钮。

（2）设置扩展模态数。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Option 菜单命令，弹出 Spectrum Analysis 对话框，Sptype 项选中 Single-pt resp 单选按钮，在 NMODE 项输入 10，如图 16-48 所示，单击 OK 按钮。

（3）设置谱类型。执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Spectrum single point → Setting 菜单命令，弹出 Settings for Single-Point Response Spectrum 对话框，在分析类型中选择 Seismic displac，下方依次输入 0、1、0，如图 16-49 所示，单击 OK 按钮。

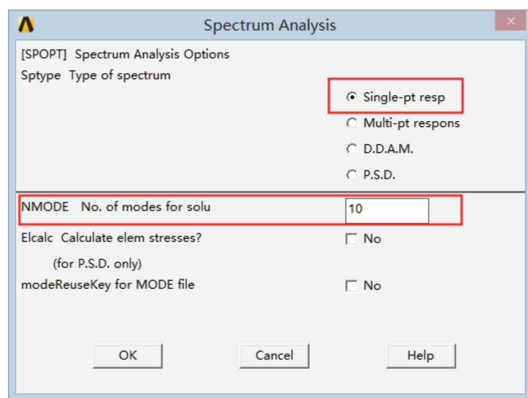


图 16-48 设置扩展解

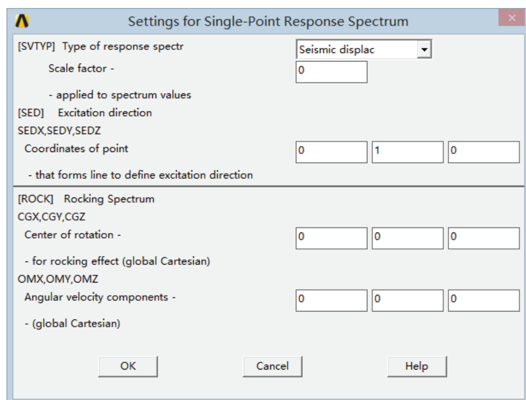


图 16-49 设置分析类型

（4）定义频率表。执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Spectrum single point → Freq Table 菜单命令，弹出 Frequency Table 对话框，在 FREQ1～FREQ8 依次设为 0.5、1、2.4、3.8、17、18、20、32，如图 16-50 所示，单击 OK 按钮。

（5）定义谱值表。执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Spectrum single point→Spectr Values 菜单命令，弹出 Spectrum Values-Damping Retio 对话框，单击 OK 按钮（接受谱值阻尼比默认为 0），弹出 Spectrum Values 对话框，SV1～SV8 依次设为 1e-3、0.5e-3、0.9e-3、0.8e-3、1.2e-3、0.75e-3、0.86e-3、0.2e-3，如图 16-51 所示，单击 OK 按钮。

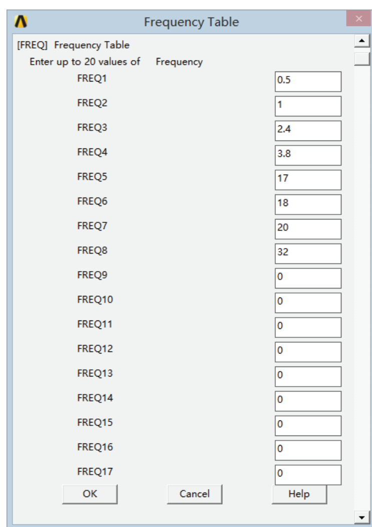


图 16-50 定义频率表

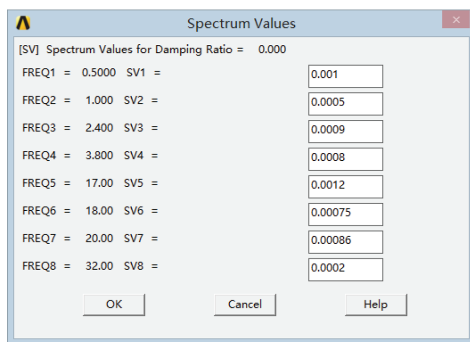


图 16-51 定义谱值表

（6）求解谱分析。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

9．扩展模态

（1）设置分析类型模态分析。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，进行求解类型的设置，选中 Modal 单选按钮，单击 OK 按钮。

（2）打开扩展项。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Type→Expansion Pass 菜单命令，打开 Expansion Pass 对话框，如图 16-52 所示，单击 OK 按钮。

（3）设置扩展参数。执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Expansion Pass→Single Expand→Expand Modal 菜单命令，弹出 Expand Modes 对话框，NMODE 项设为 10，Elcalc 项选中 Yes 复选框，SIGNIF 项设为 0.005，如图 16-53 所示，单击 OK 按钮结束。

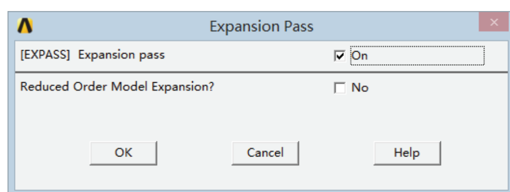


图 16-52 Expansion Pass 对话框

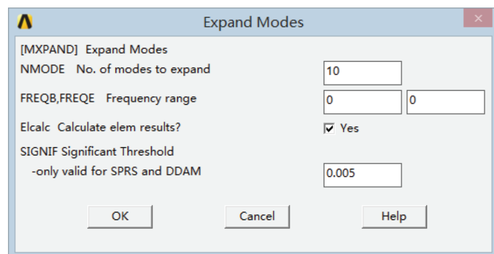


图 16-53 Expand Modes 对话框

（4）求解计算。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

10．合并模态

（1）设置分析类型谱分析。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜

单命令，弹出 New Analysis 对话框，进行求解类型的设置，选中 Spectrum 单选按钮，单击 OK 按钮。

（2）设置分析选项，取默认值。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Option 菜单命令，弹出 Spectrum Analysis 对话框，取默认值，单击 OK 按钮。

（3）模态合并参数设定。执行 Main Menu→Solution→Load Step opts→Spectrum single point→Mode Combine→SRSS Method 菜单命令，弹出 SRSS Mode Combination 对话框，SIGNIF 项设为 0.15，如图 16-54 所示，单击 OK 按钮。

（4）模态组合求解。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

11．数据后处理

（1）列出结果概要。执行 Main Menu→General Postproc→Results Summary 菜单命令，结果列表如图 16-55 所示。

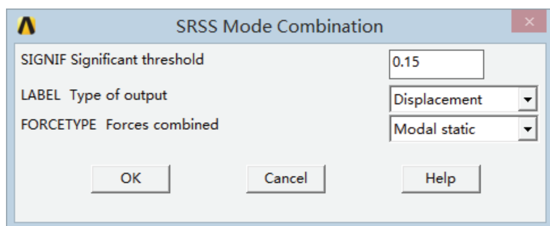
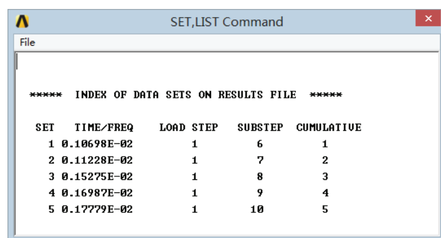


图 16-54　设置模态合并参数



SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

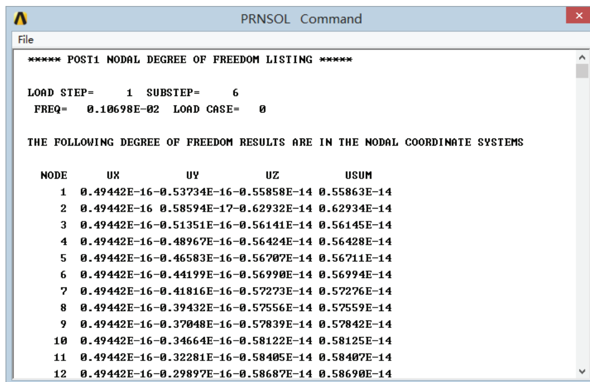
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.10698E-02	1	6	1
2	0.11228E-02	1	7	2
3	0.15275E-02	1	8	3
4	0.16987E-02	1	9	4
5	0.17779E-02	1	10	5

图 16-55　结果概要

（2）列出节点解。读取第一个解，执行 Main Menu→General Postproc→Read results→Frist set 菜单命令，读取结果完成，可以查看结果。

提示：感兴趣的读者可以查看其他步解。

列出合位移的节点解，执行 Main Menu→General Postproc→List Results→Nodal solution 菜单命令，弹出 List Nodal solution 对话框，选中 Nodal solution→DOF solution→Displacement vector sum，列出结果如图 16-56 所示。



PRNSOL Command

File

***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 6

FREQ= 0.10698E-02 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE NODAL COORDINATE SYSTEMS

NODE	UX	UY	UZ	USUM
1	0.49442E-16	-0.53734E-16	-0.55858E-14	0.55863E-14
2	0.49442E-16	0.58594E-17	-0.62932E-14	0.62934E-14
3	0.49442E-16	-0.51351E-16	-0.56141E-14	0.56145E-14
4	0.49442E-16	-0.48967E-16	-0.56424E-14	0.56428E-14
5	0.49442E-16	-0.46583E-16	-0.56707E-14	0.56711E-14
6	0.49442E-16	-0.44199E-16	-0.56990E-14	0.56994E-14
7	0.49442E-16	-0.41816E-16	-0.57273E-14	0.57276E-14
8	0.49442E-16	-0.39432E-16	-0.57556E-14	0.57559E-14
9	0.49442E-16	-0.37048E-16	-0.57839E-14	0.57842E-14
10	0.49442E-16	-0.34664E-16	-0.58122E-14	0.58125E-14
11	0.49442E-16	-0.32281E-16	-0.58405E-14	0.58407E-14
12	0.49442E-16	-0.29897E-16	-0.58687E-14	0.58690E-14

图 16-56　列出合位移的节点解

12．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。



16.5.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise16-2
/PREP7
MP,EX,1,2e11
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7800
ET, 1, Shell181                      !定义壳单元
ET, 2, Beam189                       !定义梁单元
SECTYPE,     1, BEAM, RECT, Be01, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.004,0.004,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
sect,2,shell,,Shell02
secdata, 0.002,1,0.0,3
secoffset,MID
seccontrol,,,, , , ,
K,1,0,0,0,
K,2,0.05,0,0,
K,3,0.05,0.05,0,
K,4,0,0.05,0,
KGEN,3,all, , , , ,0.05, ,0
A,5,6,7,8
A,9,10,11,12
AGEN,2,1, , , ,0.05, , ,0
AGEN,2,2, , , ,0.05, , ,0
KSEL,S,,,3,4
KGEN,2,ALL, , , ,0.05, , ,0
ALLSEL,ALL
NUMMRG,KP, , , ,LOW
LSTR,        2,        6
LSTR,        1,        5
LSTR,        6,       10
LSTR,        5,        9
LSTR,        4,        8
LSTR,        8,       12
LSTR,        3,        7
LSTR,        7,       11
LSTR,       22,       16
LSTR,       16,       20
LSTR,       21,       15
LSTR,       15,       19
```

```
ESIZE,0.002
ASEL,S,,,1,4,1
AATT,         1, ,     1,          0,     2
AMESH,ALL
ALLSEL,ALL
LSEL,U,TAN1,Z
LATT,1, ,2, , , ,1
FINISH
/SOL
ANTYPE,2
MODOPT,SNODE,10
MXPAND,0, , ,0
LUMPM,0
PSTRES,0
MODOPT,SNODE,10,0,0, ,OFF
SNOPTION,0,0,0,BOTH
KSEL,S,LOC,Z,0
DK,ALL, , , ,0,ALL, , , , , ,
ALLSEL,ALL
SOLVE
FINISH
/SOLUTION
ANTYPE,8
SPOPT,SPRS,10,0,0
SED,0,1,0,
ROCK,0,0,0,0,0,0,
FREQ,0.5,1,2.4,3.8,17,18,20,32,0
SV,0,0.001,0.0005,0.0009,0.0008,0.0012,0.00075,0.00086,0.0002,
SOLVE
FINISH
/SOL
ANTYPE,2
EXPASS,1
MXPAND,10,0,0,1,0.005,
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/SOL
ANTYPE,8
SPOPT,SPRS,10,0,0
SRSS,0.15,DISP, ,STATIC
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LIST
```

```
SET,FIRST
PRNSOL,U,COMP
FINISH
SAVE
/QUIT
```



16.6 本章小结

本章主要讲解了谐响应分析与谱分析，通过理论与实例相结合的形式进行讲解。谐响应分析与谱分析都是以模态分析为基础进行的，其中谱分析以单响应谱为例进行分析讲解。

第 17 章 结构非线性分析

本章主要介绍非线性问题，从非线性有限元分类、求解基本理论，再到实例讲解具体问题的处理方法和软件的操作步骤。实例涉及实际经常遇到的几何非线性问题和材料非线性问题，对于状态非线性问题所涉及的接触问题将会在高级分析技术中讲解，本章不再具体讨论。本章力求使读者能够用 ANSYS 处理基本的非线性问题。

学习目标：

（1）了解非线性问题基本原理；

（2）了解非线性问题基本类型；

（3）掌握非线性分析求解步骤；

（4）掌握非线性问题结果提取方法。

17.1 非线性问题概述与基础理论

本节主要讲解结构非线性的定义、结构非线性分析类型以及求解的基本原理，使读者对非线性问题有一个概括性认识。

17.1.1 结构非线性的定义

人们在日常生活中经常会遇到结构非线性。例如，用钉书机钉书，金属钉书针都将弯曲成一个形状，如图 17-1a 所示。如果在一个木架上放置重物，随着时间的迁移，它将越来越下垂，如图 17-1b 所示。当在汽车或卡车上装货时，它的轮胎和下面路面间的接触将随货物重量而变化，如图 17-1c 所示。

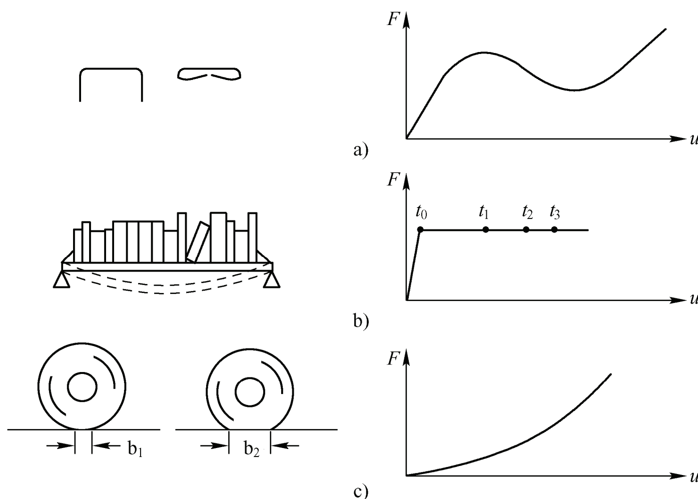


图 17-1 结构非线性行为的常见例子

a) 订书钉 b) 简支梁木架 c) 汽车轮胎

如果将上面例子中载荷的变形曲线画出来，可以发现它们都显示了非线性结构的基本特征——结构刚度改变。

17.1.2 结构非线性类型

引起结构非线性的原因很多，它可以分成 3 种主要类型：状态改变、几何非线性和材料非线性。

1．状态改变

许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为。例如，一根只能拉伸的电缆可能是松的，也可能是绷紧的；轴承套可能是接触的，也可能是不接触的；冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变在不同的值之间突然变化。

状态改变也许和载荷直接有关（如电缆），也可能由某种外部原因引起（如在冻土中的紊乱热力学条件）。接触是一种很普遍的非线性行为。接触是状态变化非线性类型中一个特殊而重要的子集。

2．几何非线性

如图 17-2 所示，如果结构经受大变形，它变化的几何形状可能会引起结构的非线性响应。一个例子是下图所示的钓鱼杆。随着垂向载荷的增加，杆不断弯曲以至于力臂明显减少，导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。几何非线性的特点是“大”位移和/或“大”转动。

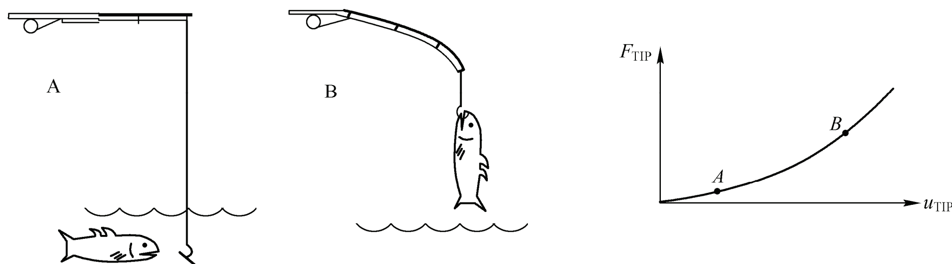


图 17-2　钓鱼杆示范几何非线性

3．材料非线性

非线性的应力—应变关系是结构非线性的常见原因。许多因素可以影响材料的应力-应变性质，包括加载历史（如在弹-塑性响应状况下）、环境状况（如温度）、加载的时间总量（如在蠕变响应状况下）。

常见的情况有：材料的塑性变形—板料冲压是一个重要的应用方面；板带的轧制也是一个典型应用，它分为冷轧和热轧，热轧时材料的非线性特征主要受温度影响。对于材料非线性，本书主要以弹塑性变性分析以及应用为主，下面介绍有关塑性的概念。

（1）塑性。

塑性是一种在某种给定载荷下，材料产生永久变形的材料特性。对大多的工程材料来说，当其应力低于比例极限时，应力—应变关系是线性的。另外，大多数材料在其应力低于屈服点时表现为弹性行为，也就是说，当移走载荷时其应变也完全消失。

由于屈服点和比例极限相差很小，因此在 ANSYS 程序中假定它们相同，在应力—应变

的曲线中低于屈服点的叫作弹性部分，超过屈服点的叫作塑性部分，也叫作应变强化部分。塑性分析中考虑了塑性区域的材料特性。

（2）路径相关性。

既然塑性是不可恢复的，那么这种问题就与加载历史有关。这类非线性问题叫作与路径相关的或非保守的非线性。

路径相关性是指对一种给定的边界条件，可能有多个正确的解，内部的应力应变分布存在。为了得到真正正确的结果，我们必须按照系统真正经历的加载过程加载。

（3）率相关性。

塑性应变的大小可能是加载速度快慢的函数。如果塑性应变的大小与时间有关，这种塑性叫作率无关性塑性；相反，与应变率有关的叫作率相关塑性。

大多的材料都有某种程度上的率相关性，但在大多数静力分析所经历的应变率范围，两者的应力应变曲线差别不大。所以，在一般的分析中，我们便认为是与率无关的。

（4）屈服准则。

屈服准则是一个可以用来与单轴测试的屈服应力相比较的应力状态的标量表示。因此，知道了应力状态和屈服准则程序，就能确定是否有塑性应变产生。

（5）流动准则。

流动准则描述了发生屈服时塑性应变的方向，也就是说，流动准则定义了单个塑性应变分量是怎样随着屈服发展的。

（6）强化准则。

强化准则描述了初始屈服准则是怎样随着塑性应变的增加发展的。一般来说，屈服面的变化是以前应变历史的函数。在 ANSYS 程序中使用了两种强化准则：等向强化和随动强化。

17.1.3 求解基本原理

类似于线性有限元法，任何非线性问题最后都可以归结为一个非线性方程组：$K(u)u=F$，其中 F 为已知的节点力向量。求解此类方程有以下几种解法。

- 直接迭代法：给定初始的 u_0，计算 K_0，得到 u_1，计算 K_1……以此循环，直到满足一定的精度要求，如 $u(n+1)-u(n)$的绝对值小于一个给定的小数。这种算法不仅收敛速度慢，而且还不稳定，因此实际计算中很少采用这种算法（实质是采用割线斜率来描述刚度矩阵）。
- Newton-Raphson 法：求解的思想与直接迭代法相同，但采用的是 U(i) 点处的切线斜率来描述刚度矩阵，从而大大提高解的收敛速度，此种方法应用较广。
- 拟 Newton 法：拟 Newton 法实质上是采用数值分析中的 Newton 差值及其改进公式的思维来描述结构的刚度矩阵，从而提高解的稳定性与收敛性。

现以 ANSYS 应用 Newton-Raphson 法的基本求解原理进行介绍。

ANSYS 程序应用 NR 法来求解非线性问题。在这种方法中，载荷分成一系列的载荷增量，载荷增量施加在几个载荷步。如图 17-3 所示，说明在单自由度非线性分析中的 NR 方法。

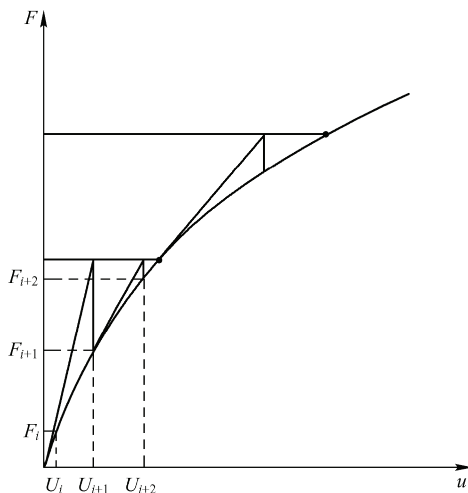


图 17-3　牛顿拉普森法（两个载荷增量）

NR 算法的计算步骤如下：

（1）假定U_0是前载荷子步得到的收敛解，第一载荷步；

（2）由U_i计算修正的切线刚度K_i^T和力F_i；

（3）由方程$K_i^T \Delta U_i = F - F_i$计算出$\Delta U_i$，其中$F$为作用载荷；

（4）由$U_{i+1} = U_i + \Delta U_i$得到下一载荷步的位移矢量；

（5）重复第（2）～（4）步，直到收敛。

在每次求解前，NR 方法估算出残差矢量，这个矢量是回复力（对应于单元应力的载荷）和所加载荷的差值。然后程序使用不平衡载荷进行线性求解，且核查收敛性。如果不满足收敛准则，重新估算非平衡载荷，修改刚度矩阵，获得新的解答。持续这种迭代过程直到问题收敛。

ANSYS 程序提供了一系列命令来增强问题的收敛性，如线性搜索、自动载荷步、二分等，可被激活来加强问题的收敛性。如果不能得到收敛，那么程序试图用一个较小的载荷增量来继续计算。对某些非线性静态分析，如果仅仅使用 NR 方法，正切刚度矩阵可能变为奇异（或非唯一），导致严重的收敛问题。这样的情况，可以使用弧长方法克服。

非线性求解可分成 3 个操作级别：载荷步、子步、平衡迭代。

- 顶层级别由在一定“时间”范围内用户明确定义的载荷步组成。假定载荷在载荷步内线性变化。
- 在每一个载荷步内，为了逐步加载，可以控制程序来执行多次求解（子步或时间步）。
- 在每一个子步内，程序将进行一系列的平衡迭代以获得收敛的解。

当确定收敛准则时，ANSYS 程序给出一系列的选择，可以将收敛检查建立在力、力矩、位移、转动或这些项目的任意组合上。

另外，每一个项目可以有不同的收敛容限值。对多自由度问题，还存在收敛模的选择。当用户确定收敛准则时，记住以力（或力矩）为基础的收敛提供了收敛的绝对量度。

如果需要，可以位移为基础（或以转动为基础的）收敛检查，但是通常不单独使用它们，只将其作为辅助的度量。最好选择力度量，辅助位移度量，完全靠位移收敛检查可能产

生错误。

需要自己设置收敛准则时，ANSYS 提供了以下 3 种收敛范数检查选择。

（1）无限范数 $\|R\|_{\infty}=\max|R_j|$。

无限范数检查所有自由度的最大不平衡量。

（2）L1 范数 $\|R\|_1=\sum|R_i|$。

L1 范数用不平衡力绝对值的和与收敛判据作比较。

（3）L2 范数 $\|R\|_2=\sqrt{(\sum R_i^2)}$。

L2 范数为默认的收敛准则，范数用力的不平衡量的 SRSS（平方和的平方根）进行收敛检查。

设置收敛准则方法及非线性求解的控制选项，执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls→Nonlinear 菜单命令，弹出的对话框如图 17-4 所示。具体选项介绍如下。



图 17-4　Solution Controls 对话框

- 线性搜索：可以增强求解收敛，但是会大大加快求解速度，程序默认选择，当遇到不收敛的情况时可以尝试打开。这个选项是对自适应下降的替代。这个收敛提高工具用程序计算出的比例因子（具有 0 和 1 之间的值）乘以计算出的位移增量。

提示：因为线性搜索算法是用来对自适应下降选项（NROPT）进行的替代，如果线性搜索选项是开启的，则自适应下降不被自动激活。不建议同时激活线性搜索和自适应下降。

- 弧长法：适用于求解不稳定的非线性静力方程。
- 最大迭代次数：一般保留程序的默认设置即可。
- 设置收敛准则：可以选择收敛准则和收敛度量设置。
- 时间步长预测：对于每一个子步的第一次平衡迭代，用户可以激活和 DOF 求解有关的预测。可加速收敛且如果非线性响应是相对平滑的，它特别有用。

单击图 17-4 中的 Set convergence criteria 按钮，弹出 Nonlinear Convergence Criteria 对话框，如图 17-5 所示。

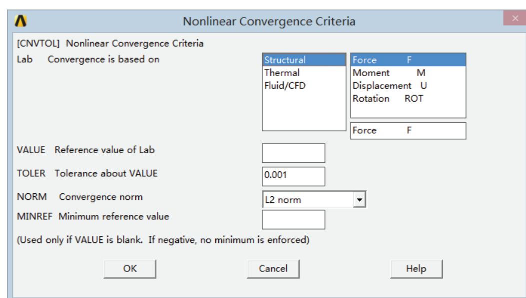


图 17-5 Nonlinear Convergence Criteria 对话框

用于分析非线性瞬态行为的过程，与对线性静态行为的处理过程相似：以步进增量加载，程序在每一步中进行平衡迭代。

静态和瞬态处理的主要不同是在瞬态过程分析中要激活时间积分效应。因此，在瞬态过程分析中“时间”总是表示实际的时序。自动时间分步和二等分特点同样适用于瞬态过程分析。

17.2 实例 1——弹簧变形分析

17.2.1 问题描述

图 17-6 所示为一个螺旋弹簧，中径 50 mm，自由高 90 mm，簧条直径 6 mm，极限挠度 *f*=30 mm，试计算极限压缩状态的应力及等效应力云图。

材料为不锈钢 3Cr13，弹性模量 2.15e11 Pa，许用应力 588 MPa，密度 7800 kg/m^3。模型为毫米制。

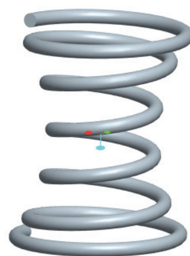


图 17-6 弹簧三维模型

17.2.2 问题分析

该问题模型相对有些复杂，可以通过专门的 CAD 软件完成建模。本算例采用在 Pro/Engineer PROE 中建立的模型导入到 ANSYS 中进行，采用单元 SOLID186 进行有限元分析。模型尺寸为毫米制，因此应力和弹性模型为 kPa。

17.2.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise17-1”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Solid 和 Brick 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，单击 OK 按钮。

选择到有 20 节点的砖块六面体单元，这个单元在实体模型单元中适应性最好计算，有 20 个节点反应信息也多，不过带来计算量也在增加。

3．导入模型文件

执行 File→import→Creo-Parame 菜单命令，在弹出的对话框中选择具体位置。单击 OK 按钮完成导入，导入后的效果如图 17-7 所示。

4．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Strutural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“2.15e8”和“0.3”，单击 OK 按钮。

提示：模型以毫米制对应，应力或弹性模量为 kPa。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“7.8e-6”，单击 OK 按钮。

5．划分网格

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 2，单击 OK 按钮。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume Sweep→Sweep 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮拾取所有体完成体网格的划分，网格划分效果如图 17-8 所示。

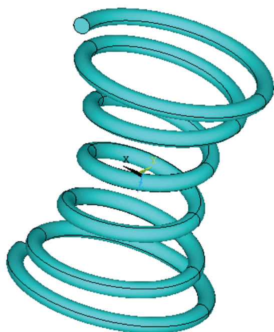


图 17-7　导入模型图

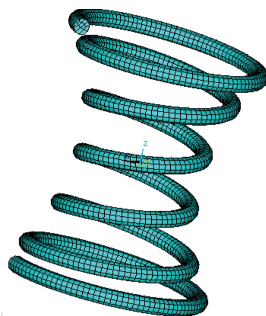


图 17-8　网格划分效果图

6．设置分析项目

该问题为几何非线性，采用 ANSYS 中静力模块的非线性求解。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Static 单选按钮，单击 OK 按钮结束。

注意：程序默认为静态分析，在此列出是为了强化分析规范意识，否则会在求解的时候出现各种错误，浪费时间。

7．求解设置

主要设置非线性求解的一些控制参数，包括结束时间、子步数、最大子步数、最小子步数、结果输出、激活自动步长。

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，在此对话框的 Basic 选项卡中做以下设置：在 Analysis Options 下的下拉列表框中选择 Large Displacement Static（大变形）；在 Time at end of load step 文本框中填入“0.2”

作为截止时间；打开自动时间步长，在 Automatic time step ping 下拉列表框中选择 On；在右下方的 Frequency 下拉列表框中选择 Write every sub step 写入每个载荷步结果，如图 17-9 所示。

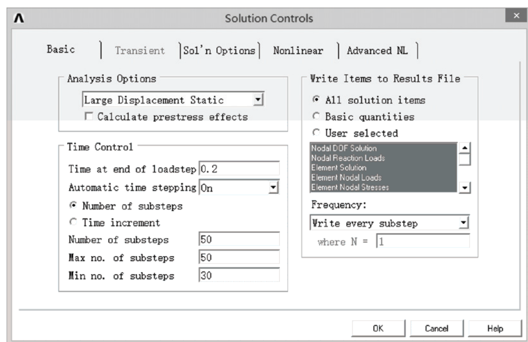


图 17-9　设置分析选项

8．添加约束和强制位移

（1）约束端面选取面 24、25、26，约束类型为全约束。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，点选端面或在文本框中输入“24,25,26”，位置如图 17-10 所示约束端，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 All DOF 项，单击 OK 按钮。

（2）施加强制位移，移约束面 1、2、4，Z 方向 30。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，点选端面或在文本框中输入“1,2,4”，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 UZ 项，在 VALUE 文本框中输入“30”，如图 17-11 所示，单击 OK 按钮结束。

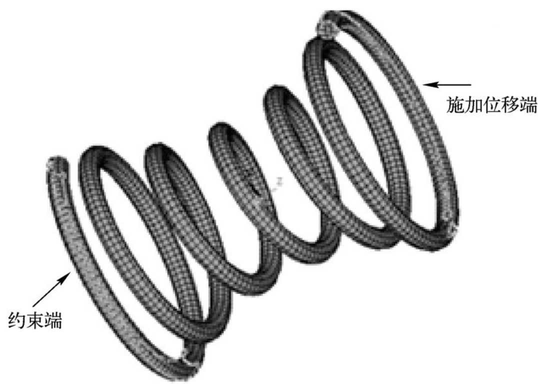


图 17-10　约束位置

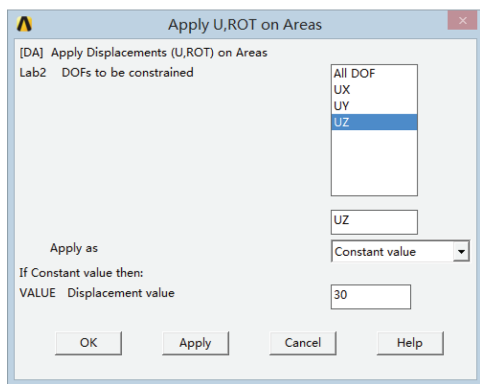


图 17-11　Apply U,ROT on Areas 对话框

9．计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

注意：非线性求解时间相对较长，具体时间随计算机配置不同也会不同。

10．结果后处理

（1）查看结果概要表。执行 Main Menu→General Postproc→Results Summary 菜单命令，

结果如图 17-12 所示。从结果概要表中可以看出总共有 31 个子载荷步。

SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.40000E-02	1	1	2
2	0.80000E-02	1	2	3
3	0.14000E-01	1	3	4
4	0.20667E-01	1	4	5
5	0.27333E-01	1	5	6
6	0.34000E-01	1	6	7
7	0.40667E-01	1	7	8
8	0.47333E-01	1	8	9
9	0.54000E-01	1	9	10
10	0.60667E-01	1	10	11
11	0.67333E-01	1	11	12
12	0.74000E-01	1	12	13
13	0.80667E-01	1	13	14
14	0.87333E-01	1	14	15
15	0.94000E-01	1	15	16
16	0.10067	1	16	17

图 17-12　结果概要列表截图

（2）读取最后一个载荷步查看变形情况。执行 Main Menu→General Postproc→Readresults→Last set 菜单命令，读取最后一个载荷步的结果。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Deformed Shape 菜单命令，弹出 Plot Deformed Shape 对话框，选中 Def+undeformed 项，单击 OK 按钮，效果如图 17-13 所示。

（3）查看等效应力云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Stress→von Mises stress，单击 OK 按钮，显示应力分布云图如图 17-14 所示。

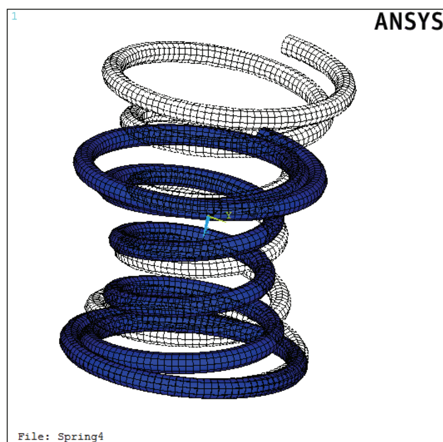


图 17-13　弹簧变形图

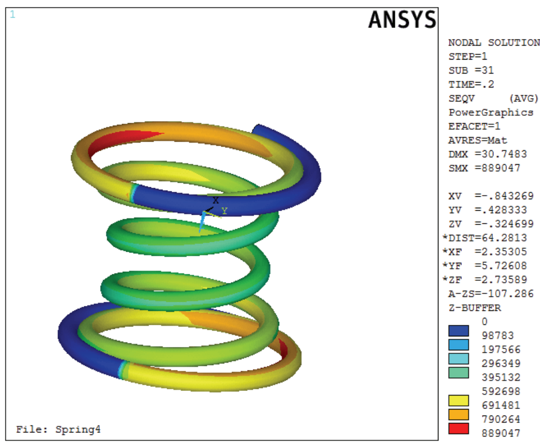


图 17-14　等效应力云图

由图可以看出最大应力为 811.9 Mpa，远小于许用应力数值。不过读者要明确，进行弹簧的有限元分析还要至少进行疲劳分析和模态分析。疲劳分析保证弹簧在使用寿命内不失效；模态分析的作用在前面章节中已经阐述，这里不再赘述。

11．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

17.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise17-1
/PREP7

ET,1,SOLID186
MP,EX,1,2.15E8
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7.8e-6
ESIZE,2
VSWEEP,ALL
/SOLU
ANTYPE,0
NLGEOM,1
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
TIME,0.2
ASEL,S,,,24,26,1
DA,ALL,ALL,
ASEL,S,,,1,2
ASEL,A,,,4
DA,ALL,UZ,30
SOLVE
/POST1
SET,LIST
SET,LAST
PLDISP,1
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
FINISH
SAVE
/QUIT
```

17.3 实例 2——碰撞分析

17.3.1 问题描述

如图 17-15 所示，一个子弹以给定的速度射向壁面，假定壁面是刚性和无摩擦的，研究

子弹和壁面接触后 80μs 内的现象。目的是确定子弹的整个变形和速度历程，以及最大等效 Von Mises 应变。

子弹的几何尺寸、材料属性和初始条件如下：

弹性模量 1.17e11Pa，密度 8930 kg/m^3，泊松比 0.35，屈服强度 4e9 Pa，剪切模量 1.0e8。

长 L=32.4e-3 m，直径 D=6.4e-3 m。

初始速度是 227 m/s。

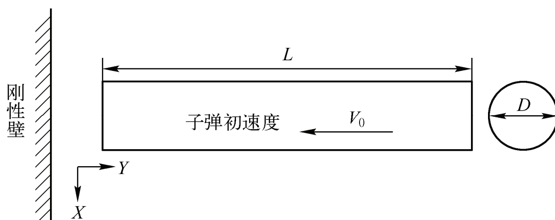


图 17-15　子弹与壁面截图

17.3.2 问题分析

本实例将选用六面体实体单元 SOLID186 来建立有限元模型。通过单一载荷步来实现求解，在这个载荷步中，同时施加初始速度和约束。将圆柱体末端的节点 Z 方向约束住以模拟壁面，打开自动时间分步，定义分析结束的时间为 8e-5 s，以确保有足够长的时间来捕捉整个变形过程。

17.3.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise17-2”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Solid 和 Brick 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，单击 OK 按钮。

选择有 20 节点的砖块六面体单元，这个单元在实体模型单元中适应性最好计算，有 20 个节点反应信息也多，不过带来了计算量的增加。

3．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“1.17e11”和“0.35”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“8930”，单击 OK 按钮。

定义非线性属性，双线性各向同性数据。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic→Hardening Plastic→Mises Plasticity→Bilinear 菜单命令，弹出 Bilinear Kinematic Hardening for

Material Number 1 对话框，Yield Stss 项设为 4e8，Tang Mods 项设为 1e8，如图 17-16 所示，单击 OK 按钮。

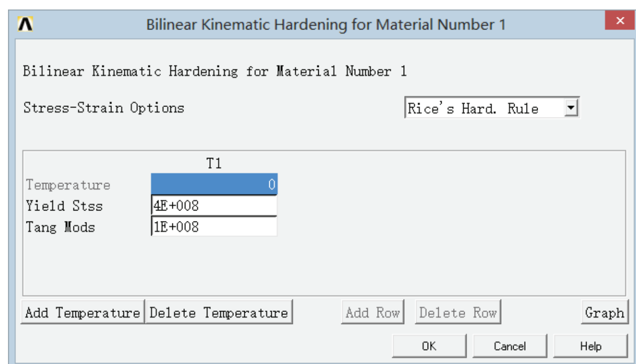


图 17-16 输入材料数据

4．建立几何模型

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Solid Cylinder 菜单命令，弹出 Solid Cylinder 对话框，依次输入圆心坐标为（0,0），半径 6.4e-3，高 32.4e-3 如图 17-17 所示，单击 OK 按钮，创建完成的效果如图 17-18 所示。

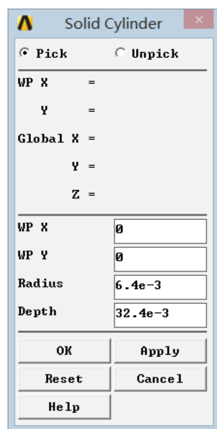


图 17-17 输入圆柱实体参数

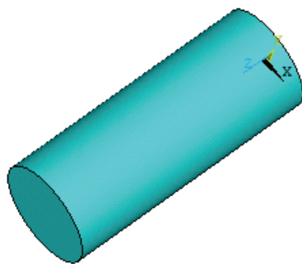


图 17-18 创建完成的效果

5．划分网格

（1）设置网格尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manual Size→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 1e-3，单击 OK 按钮。

对于非线性的隐式求解，应有较多的积分点以保证精度，因此网格划分应适当密些。

（2）划分网格。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume Sweep→Sweep 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮拾取所有体完成体网格的划分，网格划分效果如图 17-19 所示。

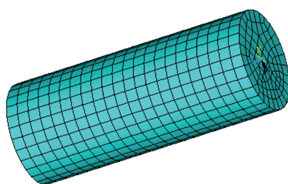


图 17-19 网格划分效果图

6．设置分析项目

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient 单选按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，取默认设置，单击 OK 结束。

7．求解设置

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，在此对话框的 Basic 选项卡中做以下设置：在 Analysis Options 下拉列表框中选择 Small Displacement Static（小变形）；在 Time at end of loadstep 文本框中填入"8e-∞5"作为截止时间；打开自动时间步长，Automatic time step ping 下拉框中选择 On；在右下方的 Frequency 下拉列表框中选择 Write Nnumber of substep，N=4，如图 17-20 所示。

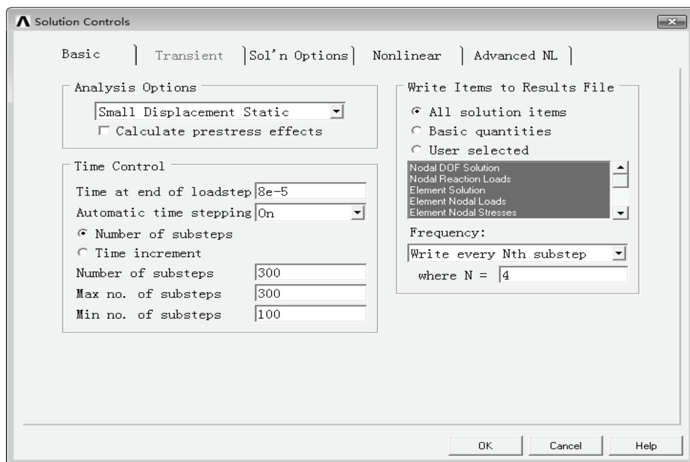


图 17-20　Solution Controls 对话框

8．添加约束条件

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取靠近坐标系的端面，即 1 号面，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 UZ 项，如图 17-21 所示，单击 OK 按钮结束。端面位置示意图如图 17-22 所示。

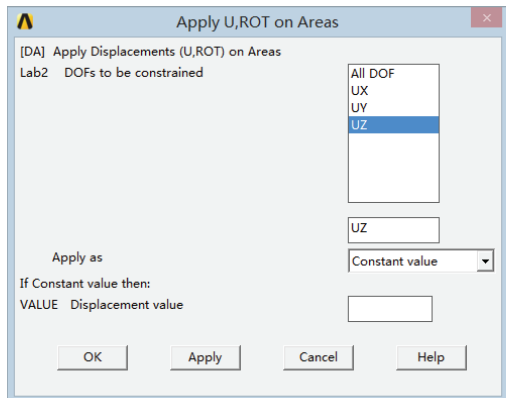


图 17-21　施加约束选项

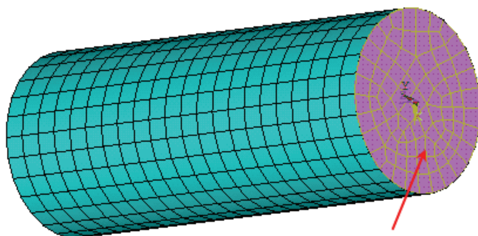


图 17-22　施加约束位置

9．添加子弹速度载荷

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Initial Condit'n→Define 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮全部选取，弹出 Define Initial Conditions 对话框，Lab 项选中 UZ，VALUE2 设为-227，如图 17-23 所示，设置完成后单击 OK 按钮结束。

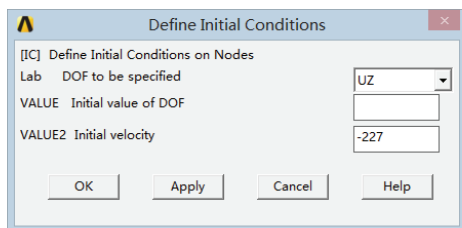


图 17-23 定义子弹速度

10．计算求解

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。当出现 Note 提示框时，表示求解结束。执行 UtilityMenu→File→Save AS 菜单命令将文件另存为适当的位置。

11．采用通用后处理器处理结果

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，在 INF0 中选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示等效应力云图。执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 DOF Solution→Displacement vector sum 项，Undisplaced shape key 项选中 Deformed shape with undeformed model，Scale Factor 项选中 True Scale，输入 0.5，如图 17-24 所示，单击 OK 按钮，显示位移分布云图如图 17-25 所示。

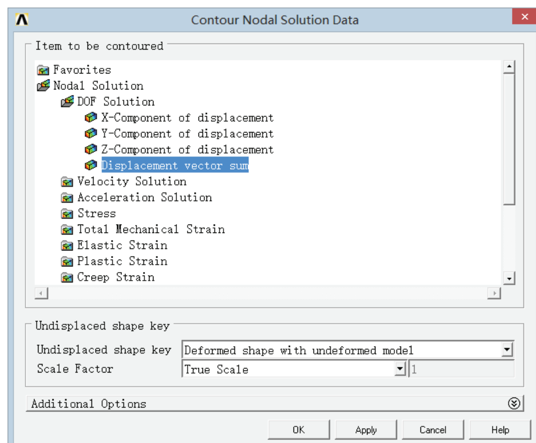


图 17-24 设置位移云图

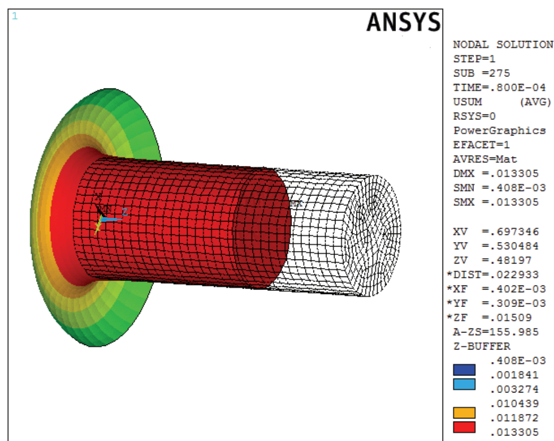


图 17-25 位移分布云图

（3）查看塑性应变云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Nodal Solution→Plastic Strain→von Mises plastic strain 项，如图 17-26 所示，单击 OK 按钮，塑性应变分布云图如图 17-27 所示。

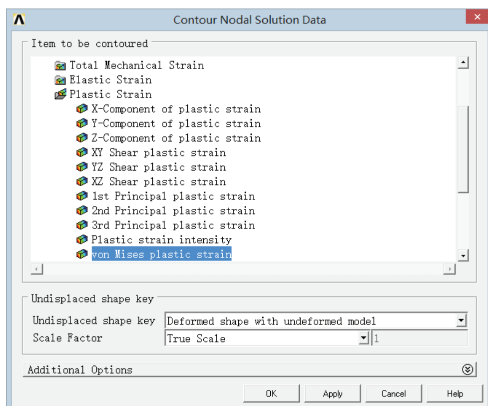


图 17-26 设置塑性应变

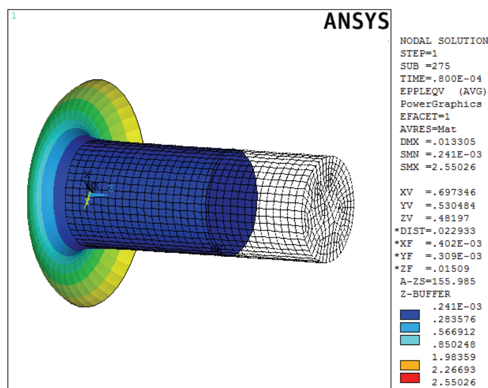


图 17-27 等效塑性应变云图

12．采用时间-历程后处理器处理结果

（1）创建变量。创建节点 7070，Z 向位移曲线。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Define Variables 菜单命令，弹出 Define Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮；出现 Add History Variables 对话框，选择 Nodal DOF Result，单击 OK 按钮；弹出节点拾取对话框，在文本框中输入“3138”，单击 OK 按钮；弹出 Define Nodal Date 对话框，选择 UZ，名称设置为 DZ，如图 17-28 所示，单击 OK 按钮。

（2）画出位移-时间变化曲线。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Graph Variables 菜单命令，弹出 Graph Time-HistoryPostero Variables 对话框，NVAR1 项设为 2，单击 OK 按钮，显示位移-时间曲线如图 17-29 所示。

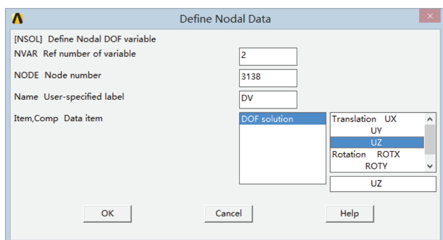


图 17-28 设置变量

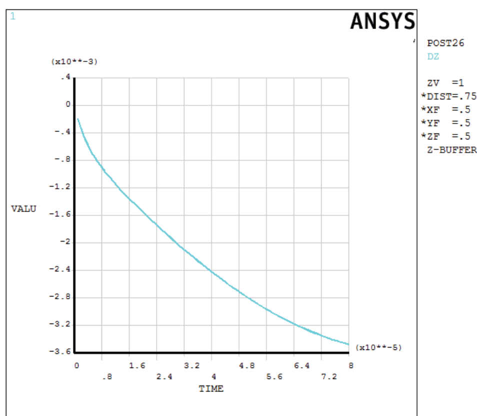


图 17-29 定义变量位移曲线

（3）计算出变量的速度-时间曲线。通过变量运算器，对定义的位移变量进行时间求导来获得节点 7070 的速度-时间历程。

执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Variable Viewer 菜单命令，弹出时间–历程变量对话框，在 Calculator（求解器）的变量名文本框中输入“VZ”，并将公式文本框清空。然后单击计算器的 DERIV 按钮，将会在公式文本框中出现微分公式“deriv(,)”。

将光标放在微分公式中括号中符号“，”的前面，单击已有变量下拉列表框中的选项“DZ”，它将会加入到公式中作为被微分的变量（用符号{}括着且为红色）。

接着将光标放在微分公式中括号里符号“，”的后面，单击已有变量下拉列表框中的选项“TIME”，将时间作为第二个变量，单击 ENTER 按钮，生成变量 VZ，如图 17–30 所示。选中 VZ 项，单击按钮，显示变量 VZ 的速度–时间曲线如图 17–31 所示。

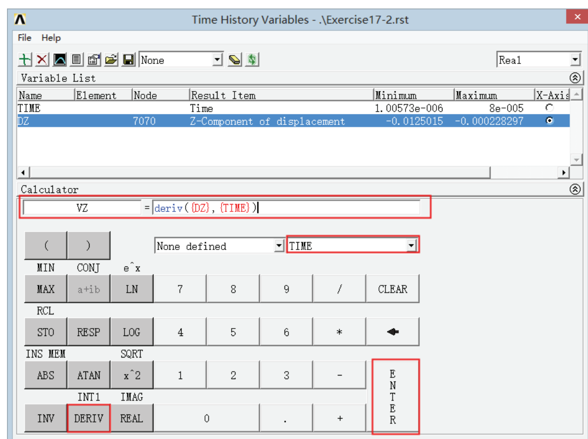


图 17–30　Time History Variables 对话框

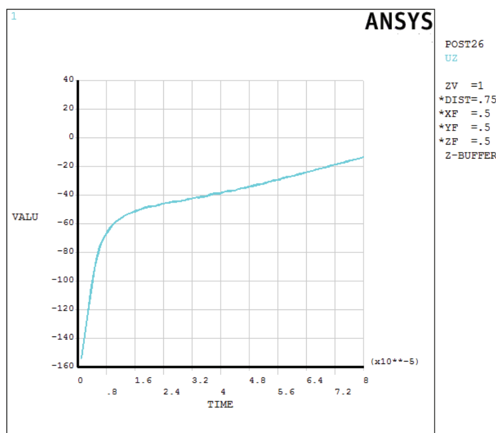


图 17–31　速度–时间曲线图

13．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

17.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise17–2
/PREP7
ET,1,SOLID186
MP,EX,1,1.17E11
MP,PRXY,1,0.35
MP,DENS,1,8930
TBDE,BKIN,1,,,
TB,BKIN,1,1,2,1
TBTEMP,0
TBDATA,,4E+008,1E+008,,,,
CYL4,0,0,6.4e-3, , , ,32.4e-3
ESIZE,1E-3
VSWEEP,ALL
```

```
/SOLU
ANTYPE,4
NLGEOM,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,4
AUTOTS,1
TIME,8e-005
deltim,4.4e-7
DA,1,UZ,
IC,ALL,UZ, ,-227,
SOLVE
/POST1
SET,LAST
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 1,1.0
PLNSOL, EPPL,EQV, 1,1.0
/POST26
FILE,'Exercise17-2','rst','.'
/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191,,,,1,1
REALVAR,191,191
NSOL,2,3138,U,Z,DZ
PLVAR,2, , , , , , , , , ,
NUMVAR,200
FILLDATA,191,,,,1,1
REALVAR,191,191
FILLDATA,192,,,,0,0
FILLDATA,193,,,,1,0
FILLDATA,194,,,,-1,0
FILLDATA,195,,,,1,1
VARNAME,195,NSET
!
! Name: VZ
! ID:    3
! Function: deriv({DZ},{TIME})
DERIV,3,2,1,,VZ
!
STORE,MERGE
XVAR,1
PLVAR,3,
FINISH
SAVE
/QUIT
```

17.4 实例 3——电子产品跌落分析

17.4.1 问题描述

手机尺寸为 130 mm×80 mm×9 mm，下方地板为水泥地面，两者相距 1.2 m，如图 17-32 所示。

重物为 ABS+PC 材料，弹性模量 2.41 GPa，泊松比 0.389，拉伸强度 56 MPa，密度 1400 kg/m^3，切变模量 86.2 MPa，屈服极限 53 MPa。

水泥地面：密度 2600 kg/m^3，泊松比 0.2，弹性模量 25 GPa。

试分析手机强度是否满足要求，选取适当节点分析跌落反弹过程中的应力随时间变化的曲线。

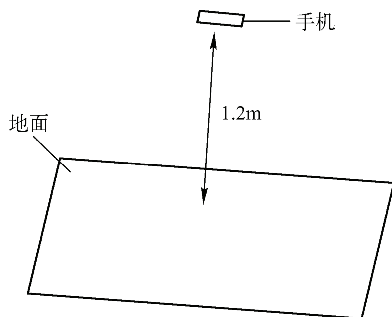


图 17-32 结构简图

17.4.2 问题分析

问题为跌落碰撞分析，适合瞬态非线性，考虑到手机和地面的刚度，把地面材料设置成刚性材料能够减少计算时间，手机采用弹塑性材料共两种材料。考虑到撞到地面还会反弹，过程时间选取 3.5 s，下面进行分析。

17.4.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入"Exercise17-3"，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Solid 和 Brick 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，单击 OK 按钮。

继续单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Shell 和 4node 181，4 节点 SHELL181 单元，单击 OK 按钮。

3．定义材料属性

（1）定义地面材料。定义弹性模量和泊松比。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框，选中 Material Model Number 1，执行 Structural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入"25e9"和"0.2"，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入"2600"，单击 OK 按钮。

（2）定义手机材料。创建新材料，在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，材料号默认为 2，单击 OK

按钮，完成 Material Model Number 2 的定义。

选中 Material Model Number 2，执行 Structural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 2 对话框，依次输入“2.41e9”和“0.389”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 2 对话框，输入“1400”，单击 OK 按钮。

定义双线性屈服应力值。执行 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→KinematicHardening Plastic→Mises Plasticity→Bilinear 菜单命令，弹出 Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 2 对话框，屈服应力 Yield Stss 项设为 5.3e7，剪切应力 Tang Mods 设为 8.62e7，如图 17-33 所示，单击 OK 按钮结束。

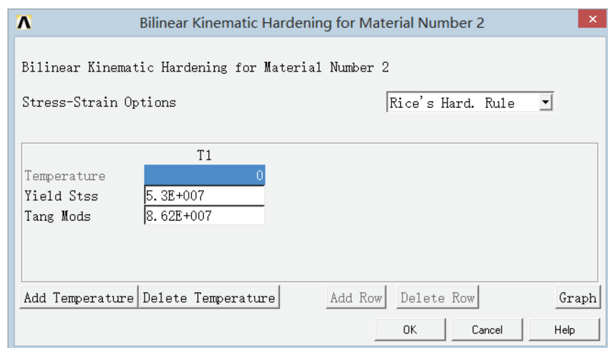


图 17-33 Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 2 对话框

4. 建立几何模型

（1）创建平面。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimension 菜单命令，弹出 Create Rectangle by Dimensions 对话框，X1、X2 项依次输入 0、1，Y1、Y2 项也依次输入 0、1，如图 17-34 所示。

（2）创建手机模型，关键点坐标（0.5,0.5,1.2）（0.63,0.58,1.209）。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Block by Dimensions 对话框，X1、X2 项依次输入 0.5、0.63，Y1、Y2 项依次输入 0.5、0.58，Z1、Z2 项依次输入 1.2、1.209，如图 17-35 所示，单击 OK 按钮。

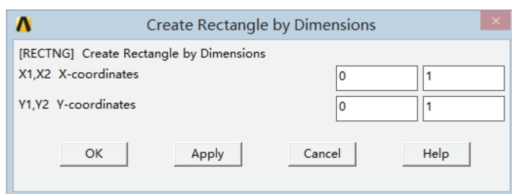


图 17-34 Create Rectangle by Dimensions 对话框

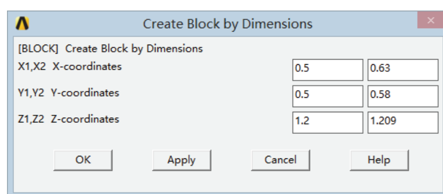


图 17-35 Create Block by Dimensions 对话框

5. 设置单元特性

壳单元厚度设置，执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Shell→Lay-up→Add/Edit 菜单命令，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框，Thickness 项设为 0.02，其他项保留默

认设置，如图 17-36 所示，单击 OK 按钮。

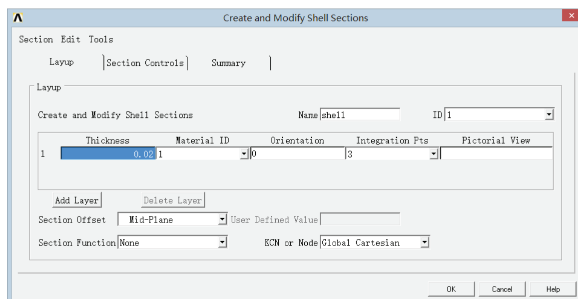


图 17-36 Create and Modify Shell Sections 对话框

6．划分网格

（1）划分体网格。

定义单元尺寸，执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Sizes 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 0.003，单击 OK 按钮。

定义体的属性，执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes 菜单命令，弹出体拾取对话框，拾取 1 号体，单击 OK 按钮，弹出 Volume Attributes 对话框，MAT 项选中 2 号材料，TYPE 项选中 1 SOLID186 项，单击 OK 按钮。

以扫略的方式划分体网格。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume Sweep→Sweep 菜单命令，弹出体拾取对话框，拾取所建立的体或输入“1”，单击 OK 按钮完成体网格的划分。

（2）划分面网格。

定义面单元尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Areas→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取所建立的水泥面或者输入“1”，单击 OK 按钮，弹出 Element Size at Picked Areas 对话框，输入“0.04”，单击 OK 按钮。

定义面的属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 1 号面或直接输入“1”，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 1 号材料，TYPE 项选中 2 SHELL181 项，SECT 项选择 1，如图 17-37 所示，单击 OK 按钮。

壳单元将定义为刚性接触的目标面，先不用划分网格，待定义完接触后会自动划分。

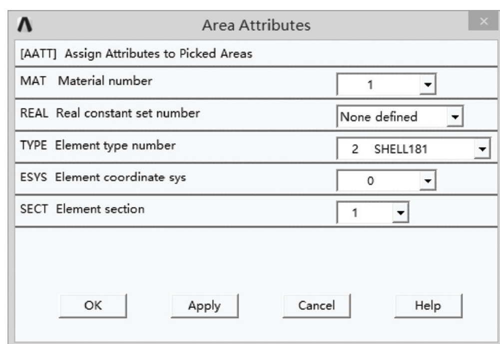


图 17-37 Area Attributes 对话框



7. 建立接触

设置接触目标为地面，接触类型为刚性 Rigid。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Contact Pair 菜单命令，弹出 Pair Based Contact Manager 对话框，如图 17-38 所示。

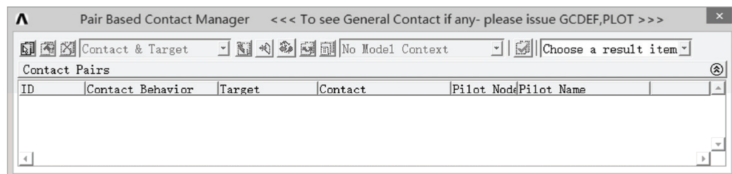


图 17-38 Pair Based Contact Manager 对话框

在 Contact Manager 对话框中，单击按钮，弹出 Contact Wizard 对话框，如图 17-39 所示，在 Target Surface 选项组中选中 Areas 单选按钮，Target Type 选项组中选中 Rigid 单选按钮，单击 Pick Target 按钮，弹出面拾取对话框，选中 List of Items 单选按钮，输入“1”，如图 17-40 所示，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。在 Contact Wizard 对话框中，Next 按钮可用，如图 17-41 所示，单击 Next 按钮，弹出图 17-42 所示的对话框。

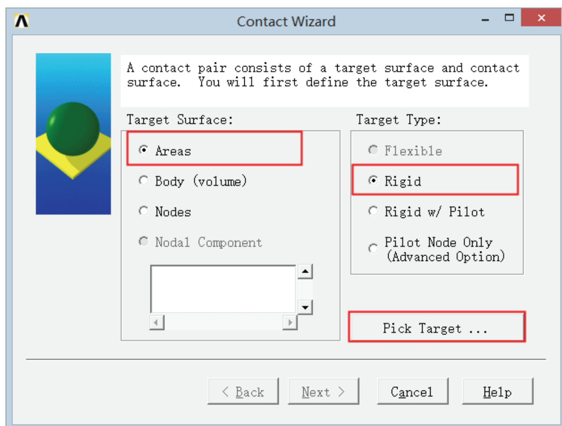


图 17-39 Contact Wizard 对话框 1

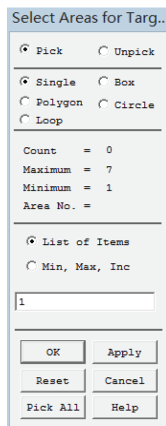


图 17-40 目标面选取对话框 1

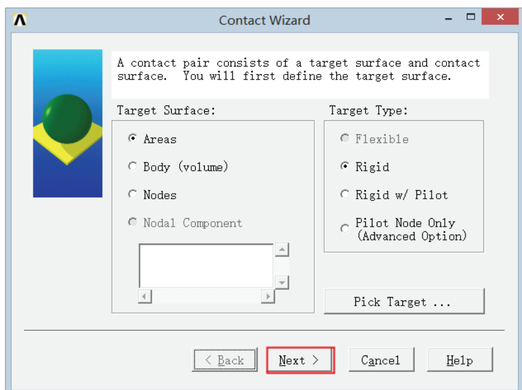


图 17-41 Contact Wizard 对话框 2

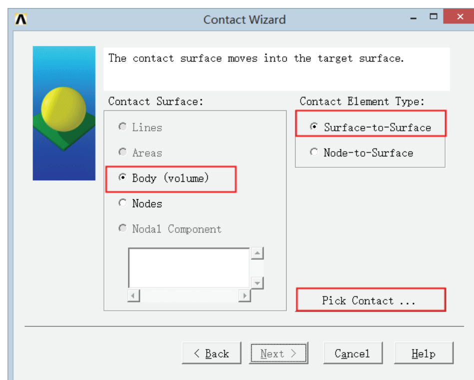


图 17-42 Contact Wizard 对话框 3

在图 17-42 所示的对话框中，在 Contact Surface 选项组中选中 Body（volume）单选按钮，Contact Element Type 选项组中选中 Surface-to-Surface 单选按钮，单击 Pick Contact 按钮，弹出体拾取对话框，选中 List of Items 单选按钮，输入 1，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。单击 Next 按钮，弹出图 17-43 所示的对话框。

Material ID 项选中 2，Coefficient of Friction 项设为 0.5，其他项保留默认设置，如图 17-43 所示，单击 Optional settings 按钮，弹出 Contact Properties 对话框，如图 17-44 所示，取默认设置，单击 OK 按钮。再单击 Create 按钮，出现划分刚性接触面的进程。划分完之后，弹出图 17-45 所示的对话框，单击 Finish 按钮结束。

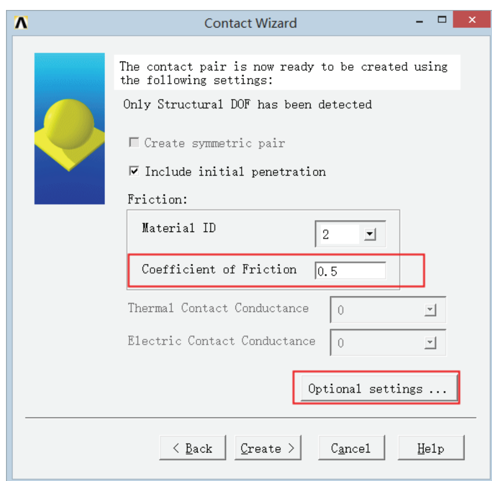


图 17-43 定义摩擦系数

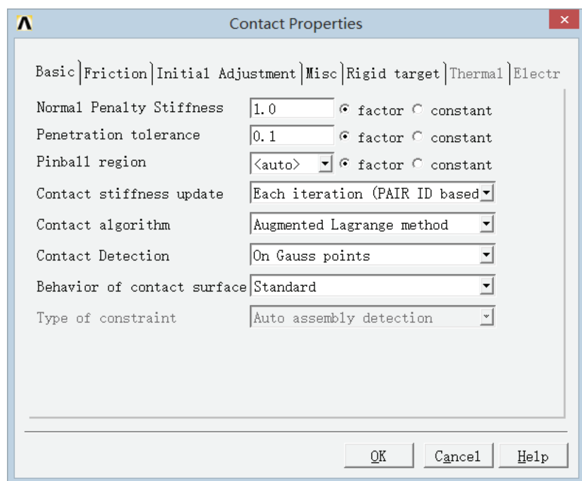


图 17-44 Contact Properties 对话框

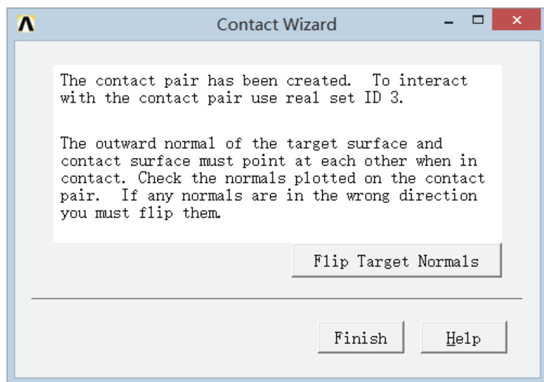


图 17-45 Contact Wizard 对话框

8. 施加边界条件

（1）添加约束条件，选中地面的 4 条边线，施加 All DOF 位移约束。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，依次输入“1,2,3,4”，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Lines 对话框，选择 All DOF 项，如图 17-46 所示，单击 OK 按钮。

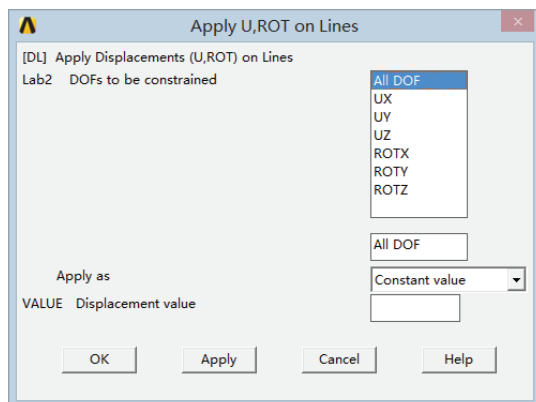


图 17-46 Apply U,ROT on Lines 对话框

（2）添加手机 Z 向重力加速度载荷。

选取手机模型所有单元。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选择 Volumes、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出体拾取对话框，拾取体或输入“1”，单击 OK 按钮。执行 Utility Menu→Select→Everything Below→Selected Volumes 菜单命令，选中隶属于体的所有体积元。选择完成可以通过 Utility Menu→Plot→Elements 菜单命令来查看单元。

创建组元。执行 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component 菜单命令，弹出 Create Component 对话框，Cname 项设为 shouji，Entity 项选中 Elements，如图 17-47 所示，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令。

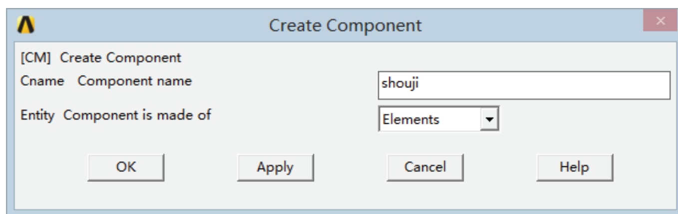


图 17-47 创建 shouji 组元

定义加速度载荷。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Apply→Structure→Inertia→Gravity→On Components 菜单命令，弹出施加重力加速度对话框，如图 17-48 所示，CM_NAME 项选中 SHOUJI，CMACELZ 项设为-9.8，单击 OK 按钮结束。

9．设置分析类型和求解选项

（1）定义分析类型。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient 单选按钮，如图 17-49 所示，弹出 Transient Analysis 对话框，保留默认设置，单击 OK 结束。

（2）定义分析选项。执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，在此对话框的 Basic 选项卡中做以下设置：在 Analysis Options 下拉列表框中选择 Large Displacement Transient（大变形）；在 Time at end of load step

文本框中输入“2”作为截止时间；打开自动时间步长，Automatic time step ping 下拉列表框中选择 On，选中 Number of substeps 单选按钮，在 Number of substeps 文本框中输入“600”，在 Max no. of substeps 文本框中输入“600”，在 Min no. of substeps 文本框中输入“250”，在右下方的 Frequency 下拉列表框中选择 Write every Nth substep，N=4，在 Transient 选项卡下选择 Stepped Loading，如图 17-50 所示。

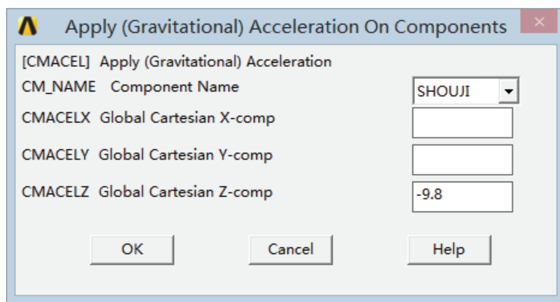


图 17-48 施加重力加速度

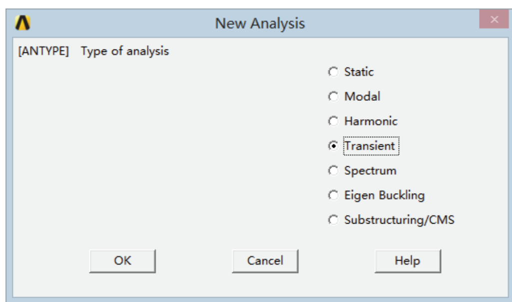


图 17-49 设置分析类型

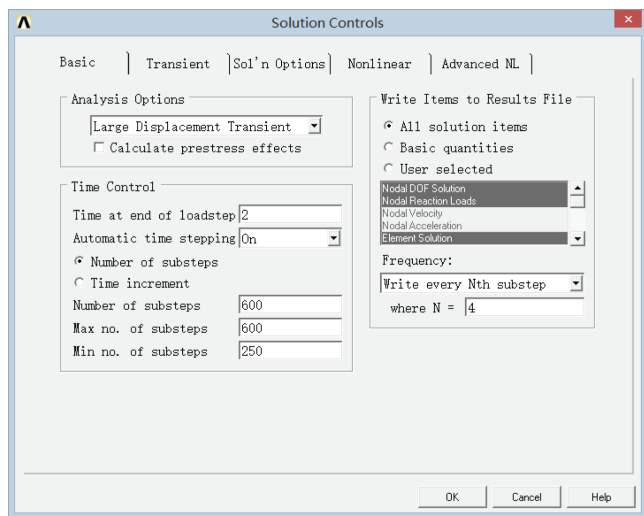


图 17-50 求解设置

10．求解计算

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

11．结果后处理

（1）计算收敛跟踪图。如图 17-51 所示，通过计算过程中查看迭代计算情况、可以明确计算的总体情况、求解的结果是否可信，如果计算的子步不收敛，程序会直接退出求解。

（2）查看手机模型中节点 1890 的位移 UZ 与时间的关系曲线。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Define Variables 菜单命令，弹出 Define Time-History Variables 对话框，单击 Add 按钮，出现 Add Time-History Variables 对话框，选择 Nodal DOF Result，单击 OK 按



钮，弹出节点拾取对话框，在文本框中输入“1890”，单击 OK 按钮，弹出 Define Nodal Data 对话框，选择 UZ，名称设置为 DZ，如图 17-52 所示，单击 OK 按钮。

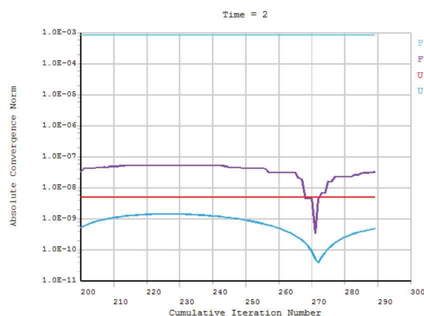


图 17-51 跟踪收敛图

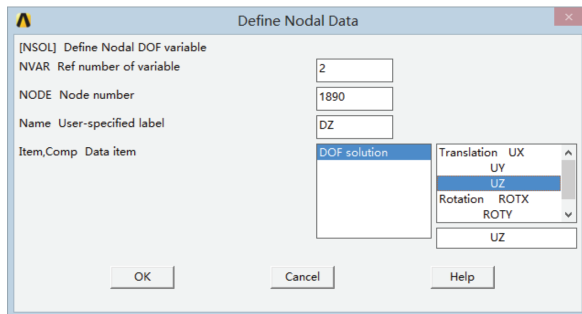


图 17-52 定义变量

（3）画出位移-时间变化曲线。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Graph Variables 菜单命令，弹出 Graph Time-HistoryPostpro Variables 对话框，NVAR1 项设为 2，单击 OK 按钮，显示位移-时间曲线如图 17-53 所示。

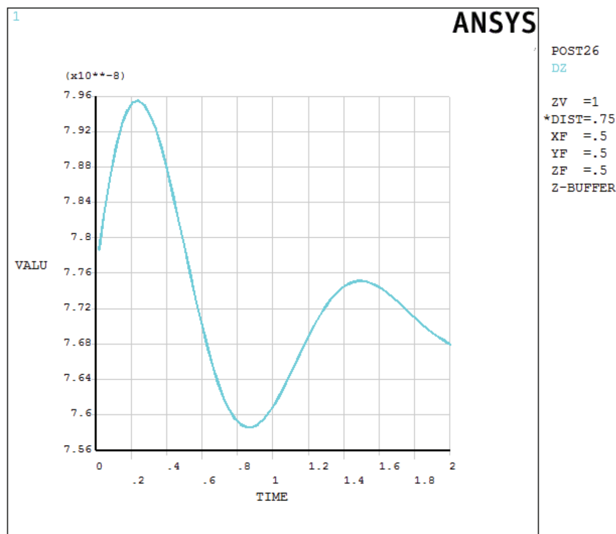


图 17-53 指定节点的位移-时间曲线

12．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

17.4.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise17-3
/PREP7
ET,1,SOLID186
```



```
ET,2,SHELL181
MP,EX,1,25e9
MP,PRXY,1,0.2
MP,DENS,1,2600
MP,EX,2,2.41e9
MP,PRXY,2,0.389
MP,DENS,2,1400
TBDE,BKIN,2,,,
TB,BKIN,2,1,2,1
TBTEMP,0
TBDATA,,5.3E+007,8.62E+007,,,,
sect,1,shell,,
secdata, 0.02,1,0.0,3
secoffset,MID
seccontrol,,,, , , ,
RECTNG,0,1,0,1,
BLOCK,0.5,0.63,0.5,0.58,1.2,1.209,
VSEL, S, , ,          1
VATT,          2, ,    1,          0
ESIZE,0.003,0,
VSWEEP,1
ASEL, S, , ,          1
AATT,          1, ,    2,          0,    1
AESIZE,1,0.04,
CM,_CONTACT,AREA
!*
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,2,0.5
MAT,2
R,3
REAL,3
ET,3,170
ET,4,174
KEYOPT,4,9,0
KEYOPT,4,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
```

```
! Generate the target surface
ASEL,S,,,1
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,3,-1
TYPE,3
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,2
ASEL,A,,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
ASEL,A,,,6
ASEL,A,,,7
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,4
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,3
ESEL,A,TYPE,,4
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
```

```
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
/MREP,EPLOT
/SOLU
LSLE,S,,,1,4,1
DL,ALL, ,ALL,
ALLSEL,ALL
VSEL,S,,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
CM,shouji,ELEM
ALLSEL,ALL
CMACEL,SHOUJI, , ,-9.8,
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
NLGEOM,1
NSUBST,600,600,250
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,4
AUTOTS,1
TIME,2
SOLVE
/POST26
FILE,'Exercise17-2','rst','.'
/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191,,,,1,1
REALVAR,191,191
NSOL,2,3138,U,Z,DZ
PLVAR,2, , , , , , , , ,
FINISH
SAVE
/QUIT
```

17.5 本章小结

本章主要讲解了结构非线性的定义、分类和求解方法等基础内容，另外通过 3 个实例，包括弹性几何大变形的弹簧变形分析、材料非线性分析和碰撞分析，使读者掌握非线性分析的基本步骤以及求解设置方法。

第 18 章　复合材料分析

复合材料（Composite Materials），是由两种或两种以上不同性质的材料，通过物理或化学的方法，在宏观上组成具有新性能的材料。本章主要学习复合材料在制备过程中的残余应力的分析过程。首先对复合材料的定义、分类以及用途做简单的介绍，再通过 1 个实例详细讲解复合材料制备过程中残余应力的分析过程。

学习目标：

（1）了解复合材料定义、类型等基本信息；

（2）掌握分析步骤；

（3）掌握查看不同部分结果显示；

（4）能够进行复合材料残余应力分析；

（5）尝试练习复合板材分析。

18.1　复合材料概述

复合材料是两种或两种以上物理或化学性质不同的材料复合在一起而形成的一种多相固体材料，具有很高的比刚度和比强度（刚度和强度与密度的比值），因而应用相当广泛，其应用既涉及航空、航天等高科技领域，也包括游艇、风电叶片等诸多民用领域。

18.1.1　复合材料的定义及分类

复合材料是指由异质、异性、异形的有机聚合物、无机非金属、金属等材料作为基体或增强体，通过复合工艺组合而成的材料。除具备原材料的性能外，同时能产生新的性能。

基体和增强体：复合材料中比较连续的相称为基体；其他的一些以独立形态分布于整个连续相中的分散相称为增强体，两者之间的结合部为界面。

复合材料是一种混合物。在很多领域都发挥了很大的作用，代替了很多传统的材料。复合材料按其组成分为金属与金属复合材料、非金属与金属复合材料、非金属与非金属复合材料。

复合材料按其结构特点又分为以下几种。

- 纤维增强复合材料：将各种纤维增强体置于基体材料内复合而成，如纤维增强塑料、纤维增强金属等。
- 夹层复合材料：由性质不同的表面材料和芯材组合而成。通常，面材强度高、薄，芯材质轻、强度低，但具有一定刚度和厚度。夹层复合材料又分为实心夹层复合材料和蜂窝夹层复合材料两种。
- 细粒复合材料：将硬质细粒均匀分布于基体中，如弥散强化合金、金属陶瓷等。
- 混杂复合材料：由两种或两种以上增强相材料混杂于一种基体相材料中构成。与普通单增强相复合材料比，其冲击强度、疲劳强度和断裂韧性显著提高，并具有特殊的热

膨胀性能。混杂复合材料又分为层内混杂复合材料、层间混杂复合材料、夹芯混杂复合材料、层内/层间混杂复合材料和超混杂复合材料。

复合材料按基体材料又可分为以下几种。

- 聚合物基复合材料：热固性，热塑性，橡胶。
- 金属基复合材料：钛铝合金、镁铝合金。
- 陶瓷基复合材料。
- 石墨基复合材料。
- 混凝土基复合材料。

18.1.2 复合材料的性能及用途

1．复合材料性能

复合材料中以纤维增强材料应用最广、用量最大。其特点是比重小、比强度和比模量大。例如碳纤维与环氧树脂复合的材料，其比强度和比模量均比钢和铝合金大数倍，还具有优良的化学稳定性、减摩耐磨、减震性好（固有频率高，内阻大）、自润滑、耐热（膨胀系数小）、耐疲劳、耐蠕变、消声、电绝缘等性能。

石墨纤维与树脂复合可得到膨胀系数几乎等于零的材料。纤维增强材料的另一个特点是各向异性，因此可按制件不同部位的强度要求设计纤维的排列。

以碳纤维和碳化硅纤维增强的铝基复合材料，在 500℃时仍能保持足够的强度和模量。碳化硅纤维与钛复合，不但钛的耐热性提高，且耐磨损，可用作发动机风扇叶片。

碳化硅纤维与陶瓷复合，使用温度可达 1500℃，比超合金涡轮叶片的使用温度（1100℃）高得多。

碳纤维增强碳、石墨纤维增强碳或石墨纤维增强石墨，构成耐烧蚀材料，已用于航天器、火箭导弹和原子能反应堆中。

非金属基复合材料由于密度小，用于汽车和飞机可减轻重量、提高速度、节约能源。用碳纤维和玻璃纤维混合制成的复合材料片弹簧，其刚度和承载能力与重量大 5 倍多的钢片弹簧相当。

2．复合材料应用领域

复合材料的主要应用领域有：

（1）航空航天领域。由于复合材料热稳定性好，比强度、比刚度高，可用于制造飞机机翼和前机身、卫星天线及其支撑结构、太阳能电池翼和外壳、大型运载火箭的壳体、发动机壳体、航天飞机结构件等。

（2）汽车工业。由于复合材料具有特殊的振动阻尼特性，可减振和降低噪声、抗疲劳性能好、损伤后易修理、便于整体成形，故可用于制造汽车车身、受力构件、传动轴、发动机架及其内部构件。

（3）化工、纺织和机械制造领域。有良好耐蚀性的碳纤维与树脂基体复合而成的材料，可用于制造化工设备、纺织机、造纸机、复印机、高速机床、精密仪器等。

（4）医学领域。碳纤维复合材料具有优异的力学性能和不吸收 X 射线特性，可用于制造医用 X 光机和矫形支架等。碳纤维复合材料还具有生物组织相容性和血液相容性，生物环境下稳定性好，也用作生物医学材料。此外，复合材料还可用于制造体育运动器件和建筑材料等。

3．玻璃纤维

目前用于高性能复合材料的玻璃纤维主要有高强度玻璃纤维、石英玻璃纤维和高硅氧玻璃纤维等。由于高强度玻璃纤维性价比较高，因此增长率也比较快，年增长率达到10%以上。

高强度玻璃纤维复合材料不仅应用在军事方面，近年来民用产品也有广泛应用，如防弹头盔、防弹服、直升机机翼、预警机雷达罩、各种高压压力容器、民用飞机直板、体育用品、各类耐高温制品以及近期报道的性能优异的轮胎帘子线等。石英玻璃纤维及高硅氧玻璃纤维属于耐高温的玻璃纤维，是比较理想的耐热防火材料，用其增强酚醛树脂可制成各种结构的耐高温、耐烧蚀的复合材料部件，大量应用于火箭、导弹的防热材料。

4．碳纤维

碳纤维具有强度高、模量高、耐高温、导电等一系列性能，首先在航空航天领域得到广泛应用，近年来在运动器具和体育用品方面也广泛采用。据预测，土木建筑、交通运输、汽车、能源等领域将会大规模采用工业级碳纤维。图18-1所示为碳纤维在飞机上的应用部位。

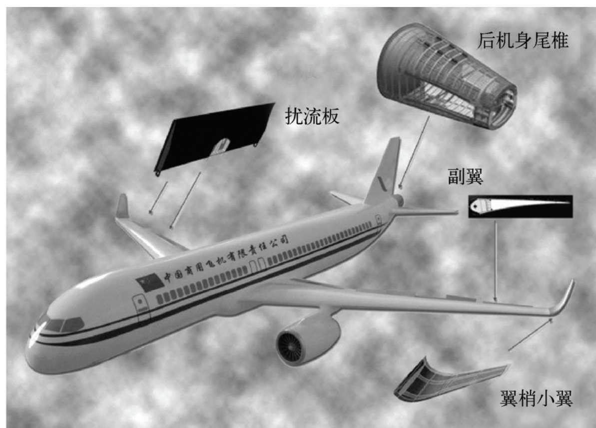


图18-1　碳纤维在飞机上的应用部位

18.1.3 树脂基和金属基复合材料

（1）金属基复合材料使用要求：

- 飞行器和卫星部件，密度小轻金属。
- 高性能发动机，耐高温合金。
- 汽车发动机，耐磨、耐热、高导热，在高温有较高强度，价格低。
- 电子工业集成电路，高导热，低热膨胀材料。

（2）金属基复合材料特点：

- 长纤维复合材料，纯合金或少量合金元素的合金。
- 不连续增强复合材料，高强度合金。

（3）树脂基基体材料要求：

- 固化特性：一般要求固化湿化尽可能小，固化压力尽可能小。
- 耐热性能：耐热性能和耐热老化性。
- 力学性能：有一定的强度、模量、延伸率、压缩性能。

18.2 实例——高体积分数 SiCp/Al 热残余应力分析

18.2.1 问题描述

对于高体积分数 SiCp/Al 碳化硅颗粒增强铝热热应力的研究较少，笔者就此对 SiC 体积分数为 63%，在 1100℃煅烧后无压渗入液态铝的结构的热应力进行分析。由于对称性，只建立 1/2 结构，图 18-2a 为三维实体模型截图，18-2b 为其线框简图。

颗粒直径为 10 mm，正方形边长为 14.2 mm。

材料参数如下：

SiC 颗粒——

密度 3210 kg/m^3；

弹性模量 550 GPa，泊松比 0.4；

膨胀系数 6e-6/℃。

铝——

密度 2700 kg/m^3；

弹性模量 70 GPa，泊松比 0.33；

切变模量 25 GPa；

屈服强度 70 MPa；

膨胀系数 2.4e-5/℃。

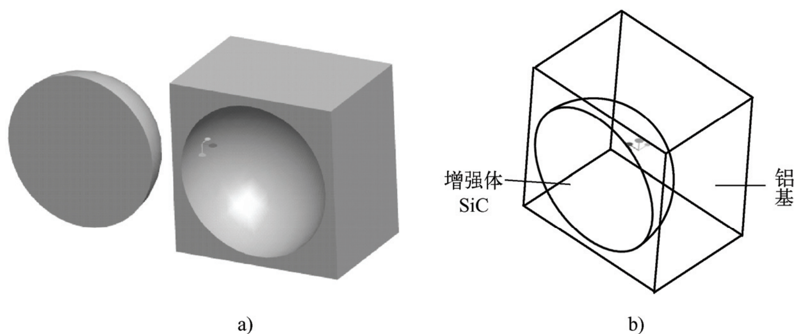


图 18-2 问题实体模型

a) 三维实体模型 b) 线框简图

18.2.2 问题分析

本算例属于典型的复合材料分析，将 Pro/Engineer 中已建立完成的模型导入到 ANSYS 中再进行网格划分和计算分析，采用单元 SOLID186 进行有限元分析。模型尺寸为毫米制，因此应力和弹性模型为 kPa。

18.2.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入

“Exercise18-1“，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Structural Solid 和 Brick 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，单击 OK 按钮。

选择到有 20 节点的砖块六面体单元，这个单元在实体模型单元中适应性最好计算，有 20 个节点反应信息也多，不过带来计算量的增加。

3．导入模型文件

执行 File→import→Creo-Parame 菜单命令，在弹出的对话框中选择具体位置，单击 OK 按钮完成导入。

4．定义材料属性

（1）定义 SiC 材料属性。

定义弹性模量和泊松比。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Prop→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框，选中 Material Model Number 1，执行 Structural→Linear→Elastic→Lsotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“550e6”和“0.4”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“3.21e-6”，单击 OK 按钮。

定义热膨胀系数。选择 Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient（平均膨胀系数）→Isotropic，弹出热膨胀系数定义对话框，在第一个文本框中输入参考温度“25”，第二个为热膨胀系数，输入“6e-6”，如图 18-3 所示，单击 OK 按钮。

（2）定义铝材料模型。

创建新材料，在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认材料号 2，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 2 的定义。

选中 Material Model Number 2，执行 Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 2 对话框，依次输入“70e6”和“0.33”，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 2 对话框，输入“2.7e-6”，单击 OK 按钮。

定义双线性屈服应力值。执行 Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinematic Hardening Plastic→Mises Plasticity→Bilinear 菜单命令，弹出 Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 2 对话框，屈服应力 Yield Stss 输入“70000”，Tang Mods 剪切应力输入“25e6”，如图 18-4 所示，单击 OK 按钮结束。

定义热膨胀系数。选择 Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient（平均膨胀系数）→Isotropic，弹出热膨胀系数定义对话框，在第一个文本框中输入参考温度“25”，第二个为热膨胀系数，输入“25e-6”，单击 OK 按钮。

5．布尔运算粘贴模型

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Volumes 菜单命

令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮完成。

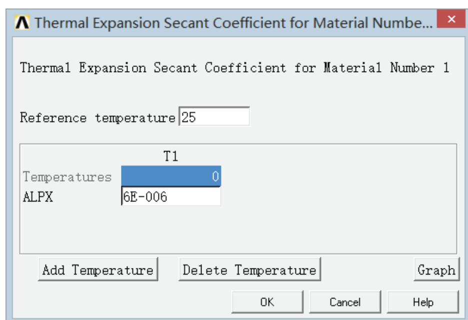


图 18-3 定义 SiC 材料热膨胀系数

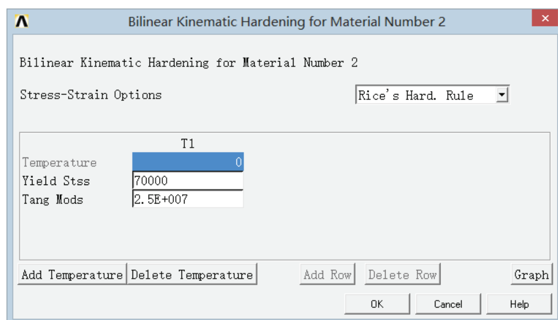


图 18-4 定义铝材料双线性屈服应力

6．划分网格

（1）定义单元尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Global→Sizes 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 0.5，单击 OK 按钮。

（2）定义体的属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes 菜单命令，弹出体拾取对话框，拾取半球体或输入“3”，单击 OK 按钮，弹出 Volume Attributes 对话框，MAT 项选中 1 号材料，TYPE 项选中 1 SOLID186 项，如图 18-5 所示，单击 OK 按钮。

继续执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes 菜单命令，弹出体拾取对话框，拾取方体或输入“4”，单击 OK 按钮，弹出 Volume Attributes 对话框，MAT 项选中 2 号材料，TYPE 项选中 1 SOLID186 项，如图 18-6 所示，单击 OK 按钮。

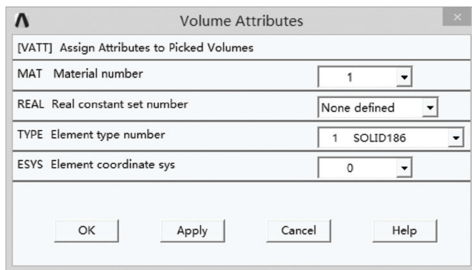


图 18-5 定义半球体属性

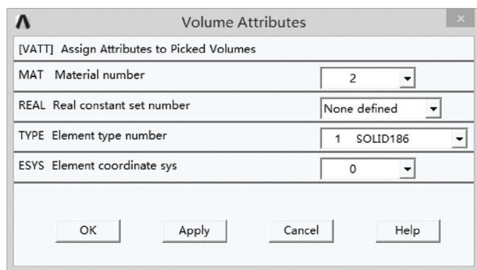


图 18-6 定义正方体属性

（3）划分体网格。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Free 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮，完成体网格的划分。

网格划分完成后，半球和正方体的网格如图 18-7 所示。

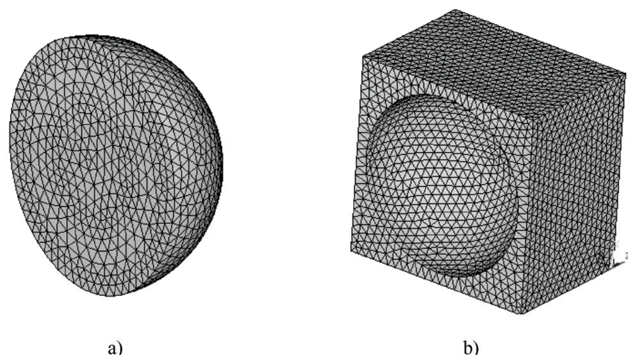
7．设置分析类型

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Static 项，单击 OK 结束。

8．定义边界条件

（1）设置参考温度为 25℃。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Setting→Reference Temp 菜单命令，弹出 Reference Temperature 对话框，TREF 项设为 25，如图 18-8 所示，单击 OK 按钮。





a)　　　　b)

图 18-7　网格划分效果图

a) 半球　b) 正方体

（2）定义约束，在外表面施加对称边界约束。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→Symmetry B.C→On Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，在文本框输入“13,14,15,16,17,5,6”，单击 OK 按钮。

（3）定义温度载荷为 660℃。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→On Volumes 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮选取所有体，弹出 Apply TEMP on Volumes 对话框，VAL1 项设为 660，如图 18-9 所示，单击 OK 按钮。

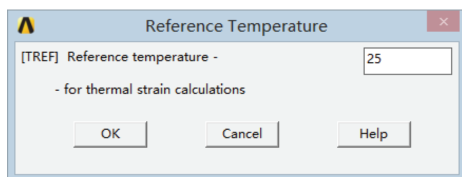


图 18-8　输入参考温度

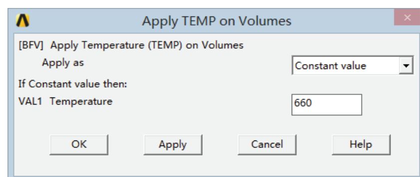


图 18-9　添加温度载荷

9．设置求解选项

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol’n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，在此对话框的 Basic 选项卡中进行以下设置：在 Analysis Options 下拉列表框中选择 Small Displacement Static（小变形）；在 Time at end of load step 文本框中填入“1”作为截止时间；打开自动时间步长，Automatic time step ping 下拉列表框中选择 On；在右下方的 Frequency 选项组中选择 Write last sub step only，如图 18-10 所示。

10．计算求解

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。当出现 Note 提示框时，表示求解结束。执行 Utility Menu→File→Save AS 菜单命令，将文件另存到适当的位置。

11．结果后处理

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）读取计算结果。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Read Result→Last

Result 菜单命令。

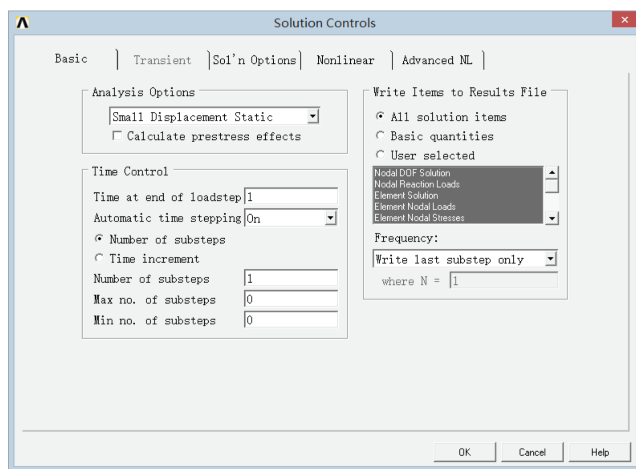


图 18-10　Solution Controls 对话框

（3）查看等效应力云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Stress→von Mises stress，单击 OK 按钮，显示应力分布云图如图 18-11 所示。

提示：如果想查看不同区域的应力分布情况，可以通过 Select 选取想要查看的单元 Element，图 18-12 所示为铝基体材料的应力分布云图。

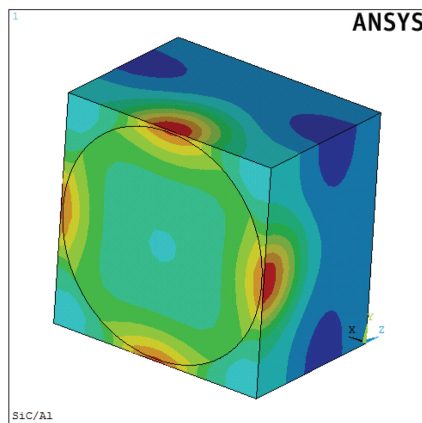


图 18-11　整体应力分布云图

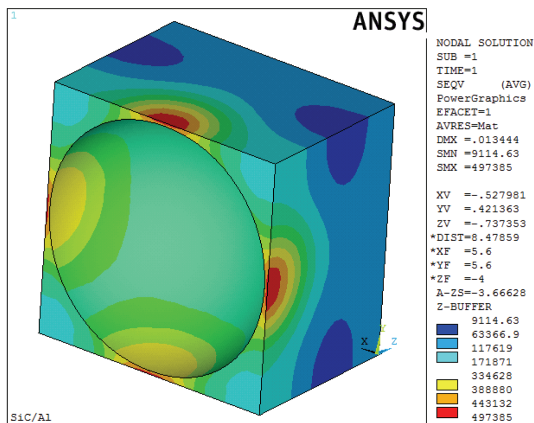


图 18-12　铝基体材料应力分布云图

（4）查看 Z 方向应力分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Stress→Z-component of stress，单击 OK 按钮，显示 Z 方向的应力分布云图如图 18-13 所示。

（5）查看 XY 平面切应力分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Stress→XY Shear Stress，单击 OK 按钮，显示 XY 平面切应力分布云图如图 18-14 所示。

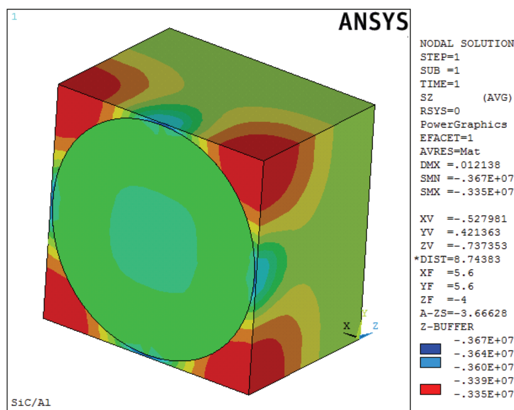


图 18-13　整体 Z 方向应力分布云图

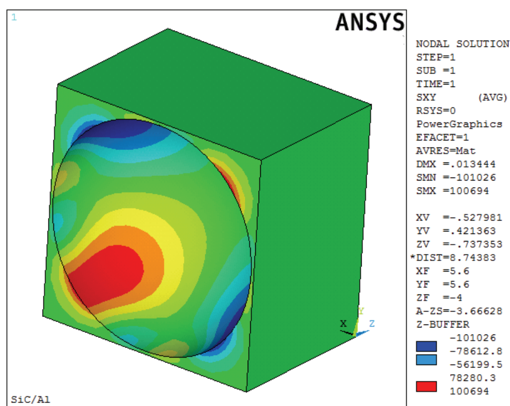


图 18-14　整体 XY 平面切应力分布云图

（6）查看塑性应变云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Plastic Strain→Von Mises plastic strain，单击 OK 按钮，显示整体塑性应变分布云图如图 18-15 所示。铝基体材料的塑性应变分布云图如图 18-16 所示。

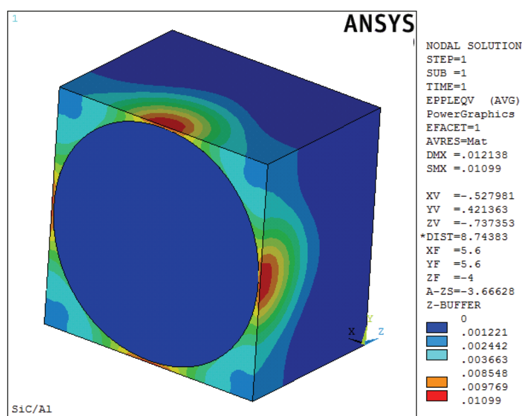


图 18-15　整体塑性应变分布云图

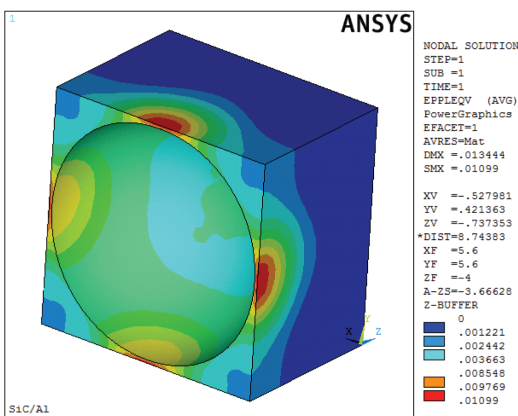


图 18-16　铝基体材料的塑性应变分布云图

由塑性应变云图可以看出，大应变发生在基体材料铝上，具体部位在半球凹槽内，符合预期估计，如果对大变形区进行进一步数据处理，可以选取符合要求的节点，列表显示后导出，应用相关数学处理软件进行处理。

12．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

18.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise18-1
/PREP7
```



```
ET,1,SOLID186

MP,EX,1,550e6
MP,PRXY,1,0.4
MP,DENS,1,3.21e-6
MP,ALPX,1,6e-6
MP,EX,2,70e6
MP,PRXY,2,0.33
MP,DENS,2,2.7e-6
MP,ALPX,2,25e-6
TBDE,BKIN,2,,,
TB,BKIN,2,1,2,1
TBTEMP,0
TBDATA,,70000,2.5E+007,,,,
ESIZE,0.5
VSEL,S,,,3
VATT,        1, ,    1,        0
VSEL,S,,,4
VATT,        2, ,    1,        0
VSWEEP,ALL
/SOLU
ANTYPE,0
TREF,25,
ASEL,S,,,13,17,1
ASEL,A,,,5,6,1
DA,ALL,SYMM
ALLSEL,ALL
BFV,ALL,TEMP,660
NLGEOM,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,LAST
AUTOTS,1
TIME,1.0
SOLVE
/POST1
SET,LAST
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
VSEL,S,MAT,,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
ALLSEL,ALL
/EFACET,1
PLNSOL, S,Z, 0,1.0
/EFACET,1
PLNSOL, S,XY, 0,1.0
```

```
/EFACET,1
PLNSOL, EPPL,EQV, 0,1.0
VSEL,S,MAT,,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
PLNSOL, EPPL,EQV, 0,1.0
ALLSEL,ALL
FINISH
SAVE
/QUIT
```

18.3　复合材料的层合板

复合材料的层合板的主要特点为多层板叠合，各层间成一定的角度，且每层的厚度一般都相同，材料相同或不同，所以只需设置对应的材料即可。用户可以通过设置实常数的形式定义层数、厚度、各层间的角度、材料类型。

以 SHELL181 单元说明复合材料的层合板的分析方法。SHELL181 单元支持所有非线性特征，包括大变形，该单元有 4 个节点且每个节点有 6 个自由度，这里仅说明如何完成单元的多层设置，其他分析步骤（如建立几何模型、加载等）在此不再说明，图 18-17 为 SHELL181 的单元设置。

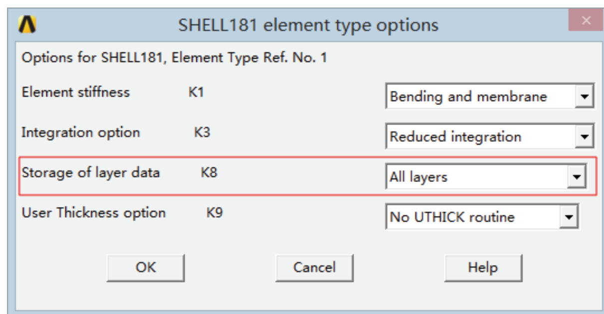


图 18-17　SHELL181 的单元设置

图 18-17 所示的关键选项为 K8，要先设置输出的形式，再选 All layers。执行 Main Menu→Preprocessor→Section→Shell→Lay-up→Add/Edit 菜单命令，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框，可以通过单击 Add Layer 按钮增加层并设置，图 18-18 所示为添加层，图 18-19 所示为具体信息。

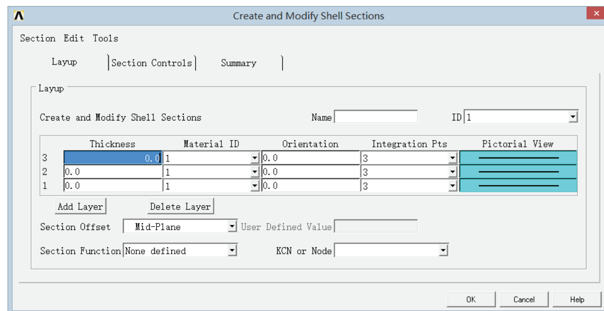


图 18-18　定义材料层厚

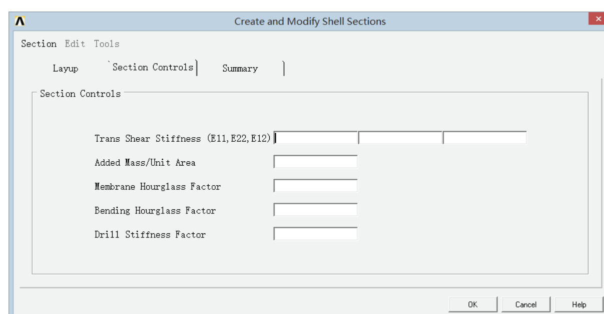


图 18-19 定义每层偏角等信息

18.4 本章小结

本章主要介绍了复合材料的基础知识，包括复合材料的分类、复合材料的性能用途、树脂基与金属基复合材料等；并详细讲解了一个高体积分数颗粒状增强体的分析过程，帮助读者对该类型问题的求解方式有系统的了解。

第 19 章　摩擦生热分析

摩擦生热是结构场引起的温度场的变化，摩擦生热分析是热应力分析中一个重要的组成部分。本章简单介绍了 ANSYS 中摩擦生热分析的基本计算方法，通过一个实例——滑动摩擦生热分析，讲述了应用 ANSYS 进行摩擦生热分析的基本思路及基本步骤和技巧。

学习目标：

（1）掌握摩擦生热在 ANSYS 中的计算方法；

（2）掌握应用 ANSYS 进行摩擦生热分析的基本操作步骤和命令。

19.1　摩擦生热在 ANSYS 中的计算方法

在 ANSYS 中，两物体由于摩擦产生的总热流率由下式计算：

$$q = \mathrm{FHTG} \times \tau \times \upsilon \qquad (19\text{-}1)$$

其中，FHTG 为摩擦生热的能力转化因子（默认为 1）；τ 为等效摩擦应力；υ 为两物体的相对滑动速率。

接触面的热流率：

$$q_c = \mathrm{FWGT} \times \mathrm{FHTG} \times \tau \times \upsilon \qquad (19\text{-}2)$$

式中，q_c 为接触面所得到的热流率；FWGT 为目标面和接触面热量分配权因子（默认值为 0.5）。

目标面的热流率：

$$q_c = (1 - \mathrm{FWGT}) \times \mathrm{FHTG} \times \tau \times \upsilon \qquad (19\text{-}3)$$

式中，q_c 为目标面所得到的热流率。

FWGT、FHTG 可以在接触向导中建立接触对时设置。

19.2　实例——物体滑动中的摩擦生热分析

19.2.1　问题描述

钢块 1 在钢块 2 上滑动，钢块 2 固定，其材料参数列于表 19-1，两钢块的尺寸及所受载荷如图 19-1 所示。两钢块之间的摩擦因数为 0.2，钢块 1 的滑动速度为 100 mm/s，计算时间为 3.75 s，计算由于两钢块之间的摩擦产生的温度场以及二者的应力分布。初始温度为 30℃。

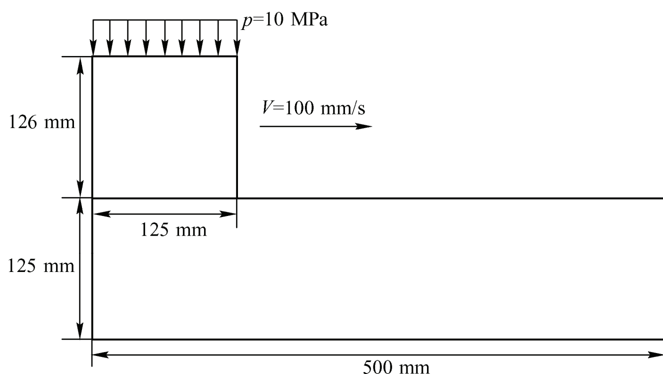


图 19-1 钢滑块和钢块的几何模型图

表 19-1 钢块材料参数表

温度 /℃	弹性模量 /GPa	密度 /(kg•m^{-3})	导热系数 /(W/(m•℃))	比热容 /(J /(kg•℃))	热膨胀系数 /(1/℃)	泊松比
30	206	7800	66.6	460	1.06E-5	0.3

19.2.2 问题分析

本问题属于热-应力耦合分析问题，采用耦合场二维八节点 PLANE223 平面单元进行分析。将滑动钢块的速度载荷转换为位移载荷施加于滑动钢块上。分析时，采用国际单位制，温度采用℃。

19.2.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname，在弹出的对话框中输入 Exercise21，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，在弹出的 Library of Element Types 对话框中选择 Plane223 单元，即选中 Coupled Field 和 Quad 8node 223，如图 19-2 所示，单击 OK 按钮。

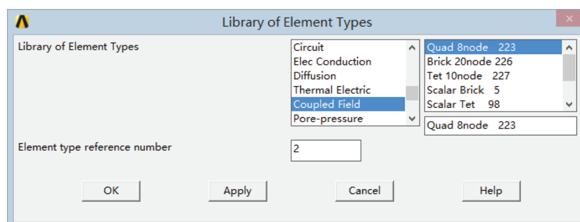


图 19-2 Library of Element Types 对话框

在 Element Types 对话框中，选中 Type 1 PLANE223，单击 Options 按钮，弹出 PLANE223 element type options 对话框，K1 项选择 Structural-thermal，如图 19-3 所示，单击 OK 按钮。

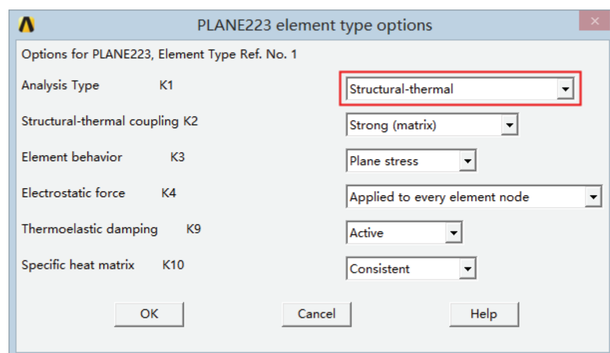


图 19-3　PLANE223 element type options 对话框

在 Element Types 对话框中，单击 Close 按钮。

3．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。

（1）定义钢块导热系数。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available →Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，KXX 项设为 66.6，单击 OK 按钮。

（2）定义钢块密度。继续执行 Material Models Available→Thermal→Density 菜单命令，弹出 Density for Material Number 1 对话框，DENS 项设为 7800，如图 19-4 所示，单击 OK 按钮。

（3）定义钢块比热容。继续执行 Material Models Available→Thermal→Specific Heat 菜单命令，弹出 Specific Heat for Material Number 1 对话框，C 项设为 460，如图 19-5 所示，单击 OK 按钮。

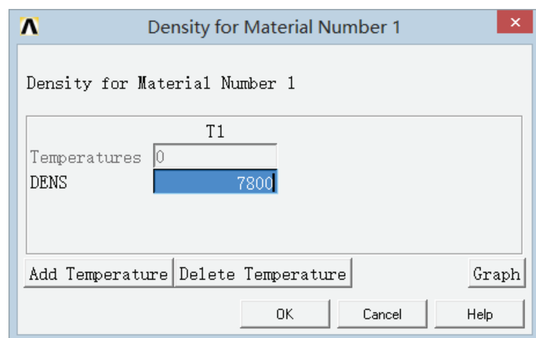


图 19-4　定义材料 1 密度

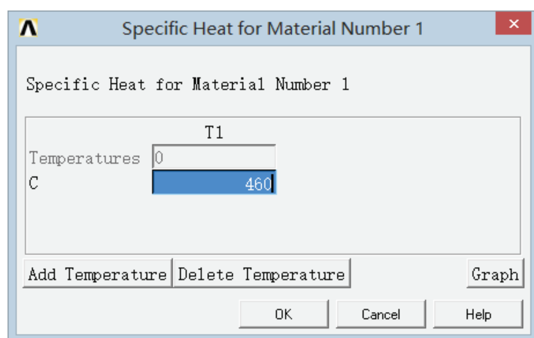


图 19-5　定义材料 1 比热容

（4）定义钢块弹性模量和泊松比。继续执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，EX 项设为 206E9，NUXY 项设为 0.3，如图 19-6 所示，单击 OK 按钮。

（5）定义钢块热膨胀系数。继续执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic 菜单命令，弹出 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框，ALPX 项设为 1.06e-5，Reference temperature 项设为 20，如

图 19-7 所示，单击 OK 按钮。

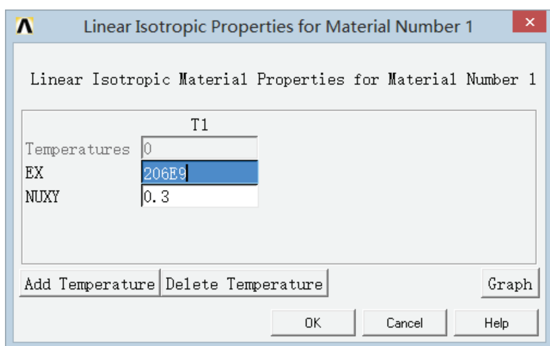


图 19-6 定义材料 1 弹性模量和泊松比

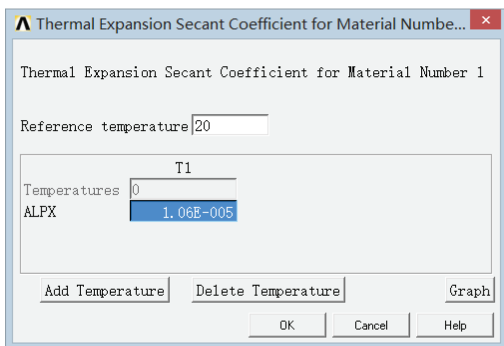


图 19-7 定义材料 1 热膨胀

（6）定义钢块摩擦系数。继续执行 Material Models Available→Structural→Friction coefficient 菜单命令，MU 项设为 0.2，如图 19-8 所示，单击 OK 按钮。

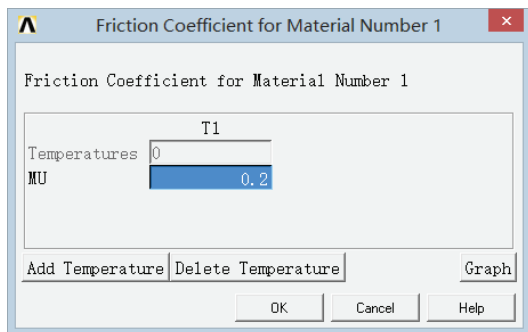


图 19-8 定义材料 1 摩擦系数

4．建立几何模型

（1）建立固定钢块矩形。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Rectangle by Dimensions 对话框，依次将 X1、X2、Y1、Y2 设为 0、0.5、0、0.125，单击 Apply 按钮。

（2）建立滑动钢块矩形。继续依次将 X1、X2、Y1、Y2 设为 0、0.125、0.125、0.25，单击 OK 按钮。

5．划分单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，在弹出的 Global Element Sizes 对话框中，将 SIZE 项设为 0.025，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Target Surf 菜单命令，选择 Pick All，生成有限元模型。

提示：在不赋予模型材料和单元属性的情况下，材料默认为 1 号材料，单元类型默认为 1 号单元。

所建立的模型线编号模型图如图 19-9 所示。

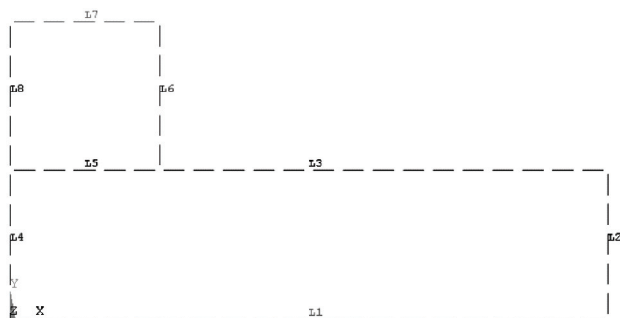


图 19-9　建立的模型线编号模型图

6．建立接触单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Contact Pair 菜单命令，弹出 Pair Based Contact Manager 对话框，如图 19-10 所示。

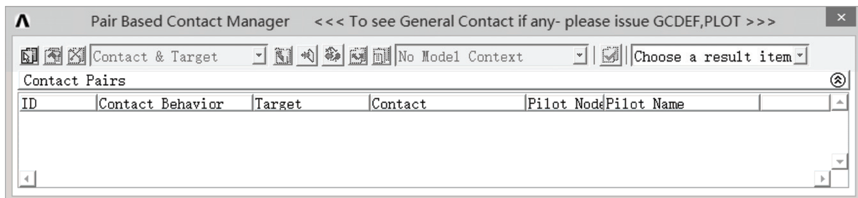


图 19-10　Pair Based Contact Manager 对话框

在 Pair Based Contact Manager 对话框中，单击按钮，弹出 Contact Wizard 对话框，如图 19-11 所示，单击 Pick Target 按钮，弹出 Select Lines for Target 对话框，选中 List of Items 单选按钮，输入“3”，如图 19-12 所示，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。在 Contact Wizard 对话框中，Next 按钮可用，如图 19-13 所示，单击 Next 按钮，弹出图 19-14 所示的对话框。

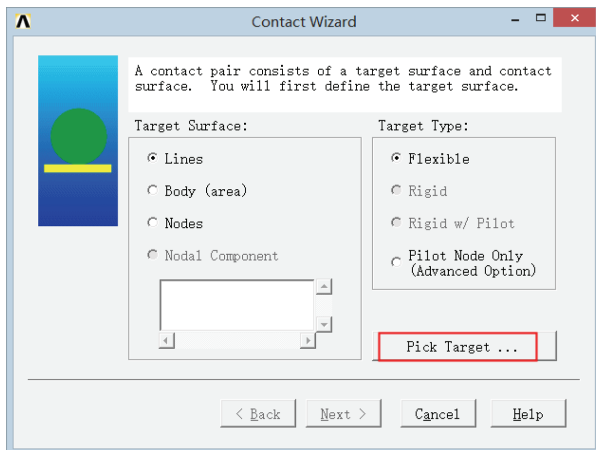


图 19-11　Contact Wizard 对话框 1

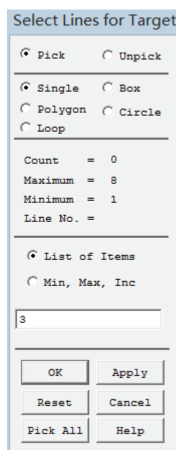


图 19-12　Select Lines for Target 对话框

在图 19-14 所示的对话框中，单击 Pick Contact 按钮，弹出线拾取对话框，选中 List of Items 单选按钮，输入“5”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。在 Contact Wizard 对话框

中，Next 按钮可用，单击 Next 按钮，弹出图 19-15 所示的对话框。

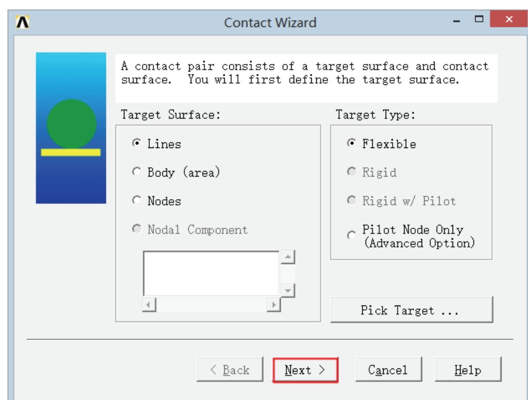


图 19-13 Contact Wizard 对话框 2

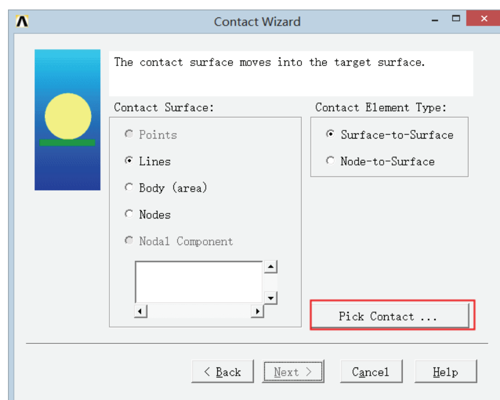


图 19-14 Contact Wizard 对话框 3

Material ID 项选中 1，Coefficient of Friction 项设为 0.2，其他项保留默认设置，如图 19-15 所示，单击 Optional settings 按钮，弹出 Contact Properties 对话框，如图 19-16 所示，选中 Thermal 选项卡，按图输入各参数，单击 OK 按钮。

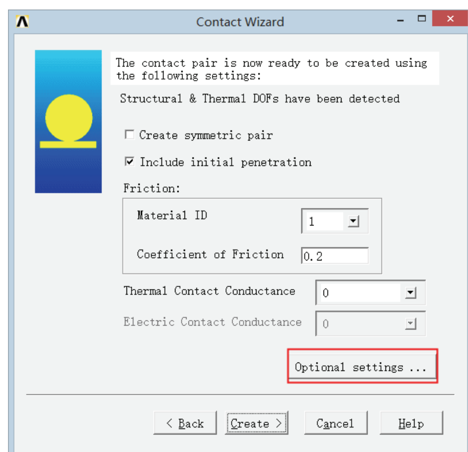


图 19-15 Contact Wizard 对话框 4

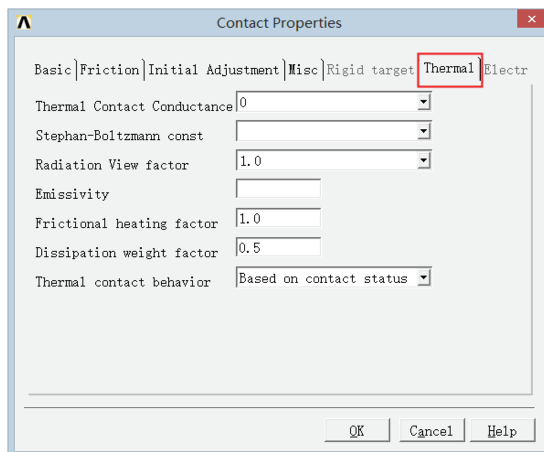


图 19-16 Contact Properties 对话框

在图 19-15 中单击 Create 按钮建立接触，如图 19-17 所示，单击 Finish 按钮，关闭 Contact Wizard 对话框，即可完成滑动钢块与固定钢块间接触的定义。



图 19-17 所建立的接触及接触提示

注意：摩擦生热过程存在物体相互位置的变化，因此必须建立接触来实现不同物体之间自由度的连接。

7．施加随时间变化的压力载荷

（1）定义载荷矩阵。执行 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit 菜单命令，弹出 Array Parameters 对话框（见图 19-18），单击 Add 按钮，弹出 Add New Array Parameter 对话框，Par 项设为 Pre，Type 项选中 Table，在 I,J,K 项依次设为 2、1、1，在 Var1 项设为 TIME，Var2 项设为 PRESSURE，如图 19-19 所示，单击 OK 按钮。

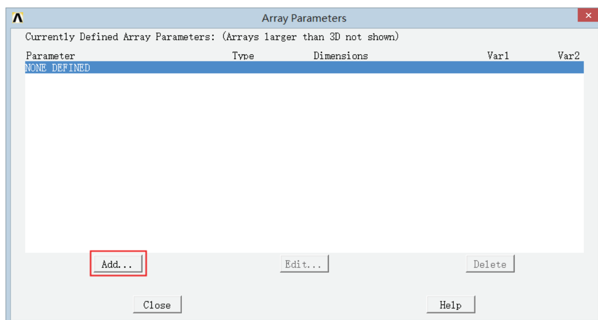


图 19-18　Array Parameters 对话框

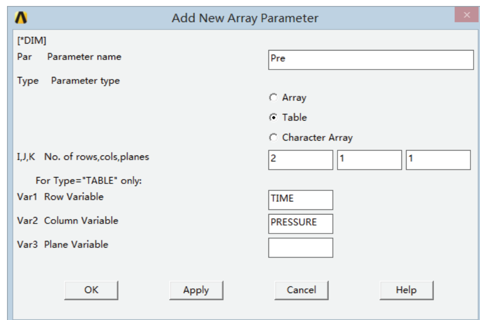


图 19-19　Add New Array Parameter 对话框

（2）设置 Table 矩阵参数。在 Array Parameters 对话框中，如图 19-20 所示，选中 PRE，单击 Edit 按钮，弹出 Table 表输入参数对话框，按照图 19-21 所示输入矩阵参数值，执行 File→Apply/Quit 菜单命令，如图 19-22 所示，将矩阵参数定义对话框关闭。

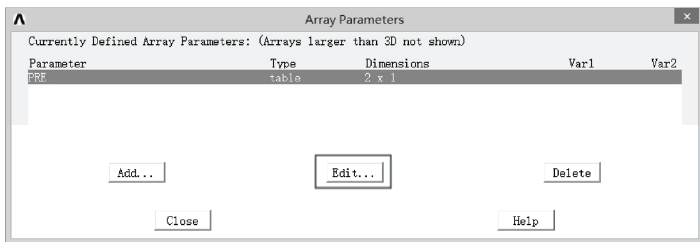


图 19-20　Array Parameters 对话框

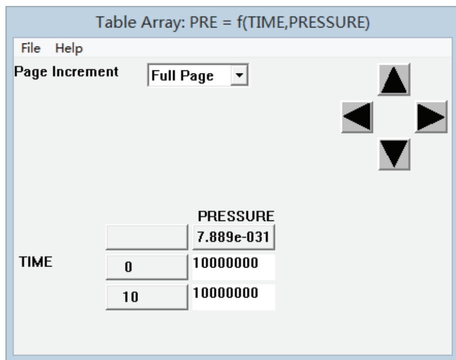


图 19-21　Table 表输入参数

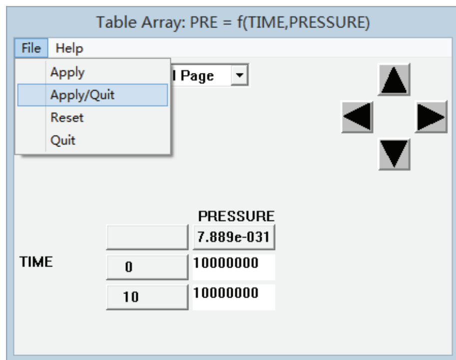


图 19-22　Table 表输入参数关闭示意图

（3）施加压力载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，拾取图 19-9 所示的 7 号线，单击 OK 按钮，弹出 Apply PRES on lines 对话框，SFL 项选中 Existing table，如图 19-23 所示，单击

OK 按钮，弹出施加压力载荷的表格的对话框，选中 PRE，如图 19-24 所示，单击 OK 按钮。完成随时间变化的压力载荷的定义。

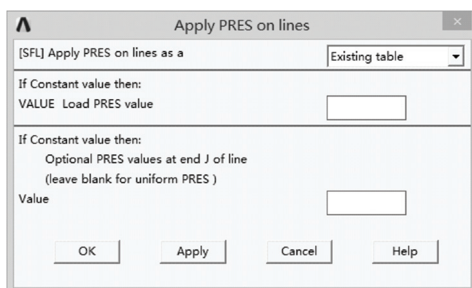


图 19-23 施加压力载荷

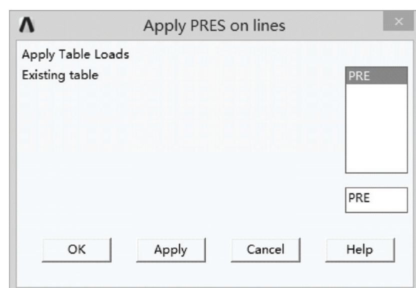


图 19-24 选择所建立的压力载荷的 Table 表

8. 施加边界条件

（1）施加温度载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→Uniform Temp 菜单命令，弹出 Uniform Temperature 对话框，输入“30”，如图 19-25 所示，单击 OK 按钮。

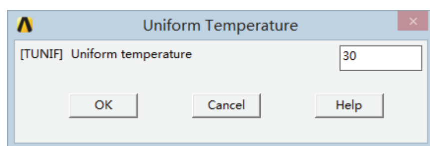


图 19-25 Define Initial Conditions 对话框

（2）施加固定钢块位移约边界条件。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，选中固定的钢块，即 1 号面，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 UX，如图 19-26 所示，单击 Apply 按钮。再选择固定钢块，在弹出的 Apply U,ROT on Areas 对话框中选中 UY，单击 OK 按钮。

（3）给滑动钢块施加位移载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，选中图 19-9 所示的 6 号线，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Lines 对话框，Lab2 项选中 UX，VALUE 项设为 0.375，如图 19-27 所示，单击 OK 按钮。

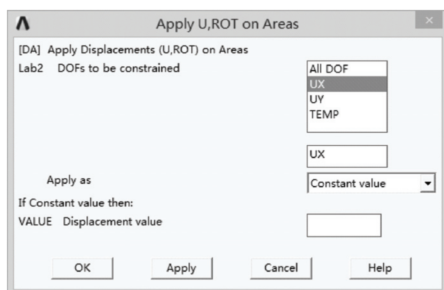


图 19-26 Apply U,ROT on Areas 对话框

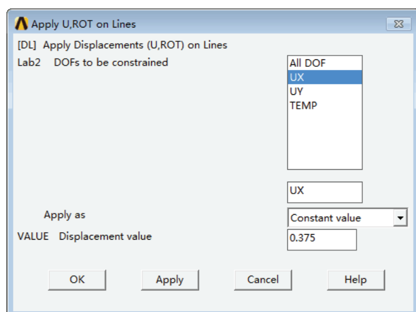


图 19-27 Apply U,ROT on Lines 对话框

9．设置求解选项

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient 单选按钮，如图 19-28 所示，单击 OK 按钮。弹出 Transient Analysis 对话框，保留默认设置，如图 19-29 所示，单击 OK 按钮。

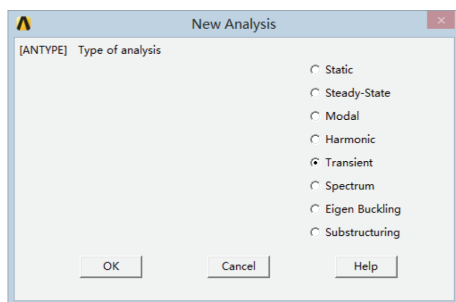


图 19-28 New Analysis 对话框

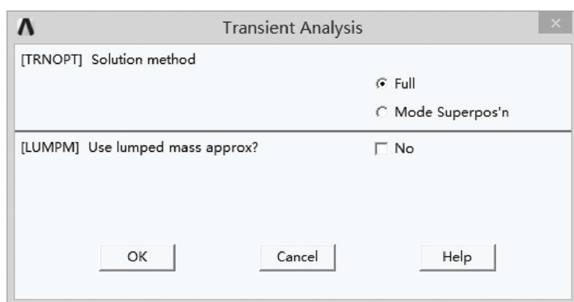


图 19-29 Transient Analysis 对话框

10．设置求解控制

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，选中 Basic 标签，在 Analysis Options 下拉列表框中选择 Large Displacement Transient，Time at end of loadstep 项设为 3.75，Number of substeps 项设为 100，Max no. of substeps 项设为 1000，Min no. of substeps 项设为 100，在 Frequency 下拉列表框中选中 Write Every Nth substep，where N=项设为 10，如图 19-30 所示。

继续选中 Transient 标签，在对话框中的 Full Transient Options 中选择 Ramped loading，如图 19-31 所示，单击 OK 按钮。

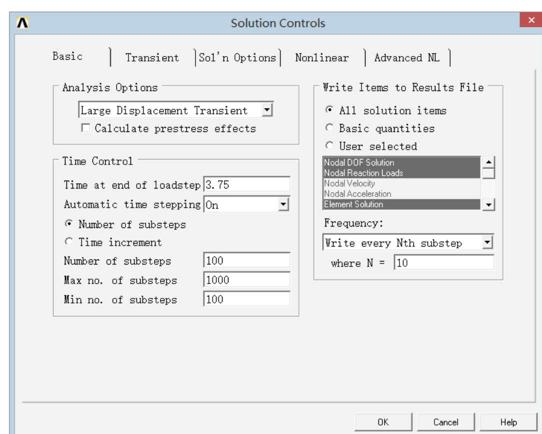


图 19-30 Basic 选项卡

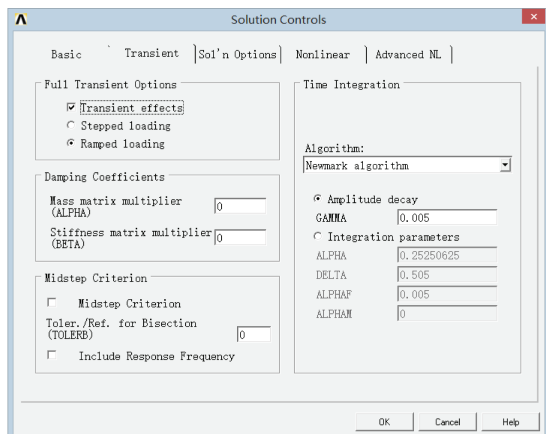


图 19-31 Transient 选项卡

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Full Transient Analysis 对话框，NROPT 项选中 Program chosen 和 OFF，TOFFST 项设为 273，如图 19-32 所示，单击 OK 按钮。

11．求解并存盘

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS 工具条中的 Save_DB 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算并存盘。

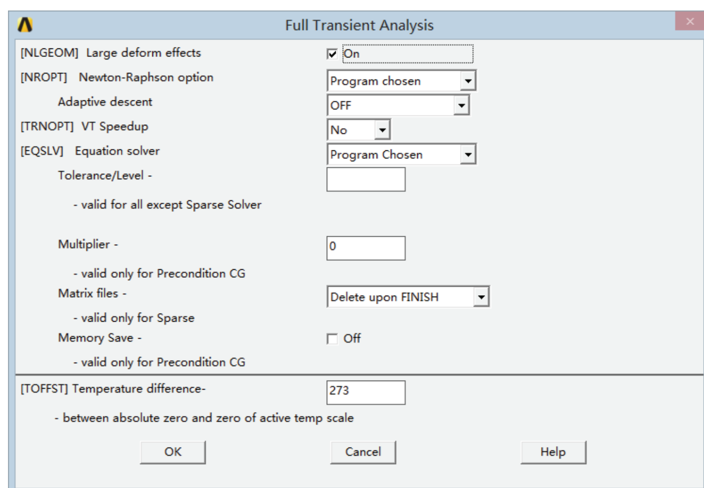


图 19-32 Full Transient Analysis 对话框

12．显示计算结果

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示温度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Nodal Temperature 选项，Undisplaced shape key 项选中 Deformed shape with undeformed model，如图 19-33 所示，单击 OK 按钮，所得温度分布如图 19-34 所示。

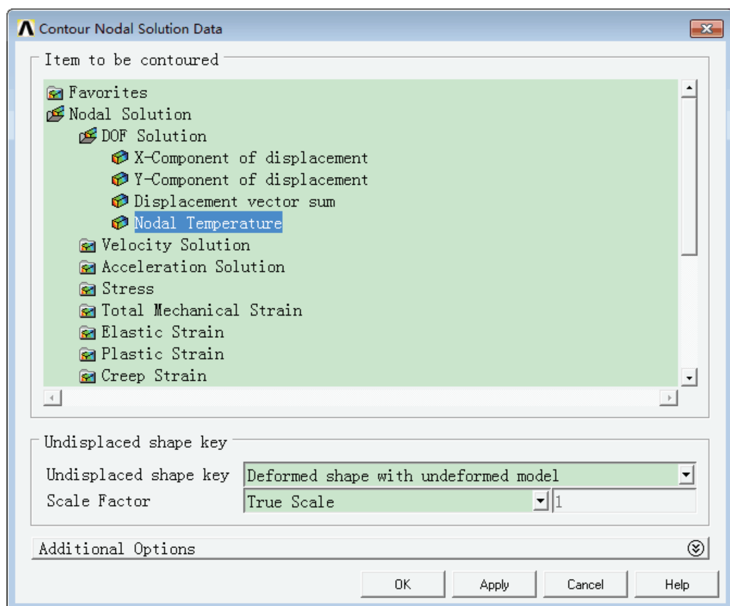


图 19-33 Contour Nodal Solution Data 对话框

（3）显示等效应力分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Stress，von Mises Stress 选项，Undisplaced shape key 项选中 Deformed shape with undeformed model，单击 OK 按钮。所得等效应力分布如图 19-35 所示。

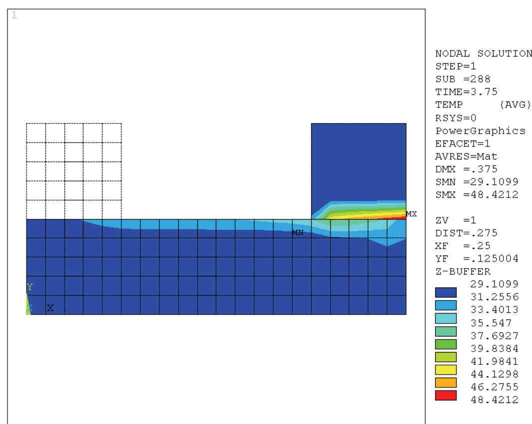


图 19-34 温度场分布云图

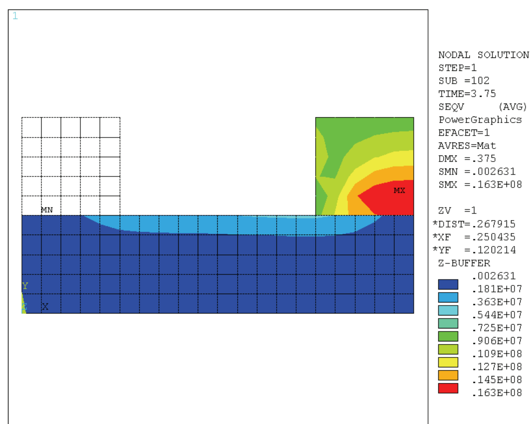


图 19-35 等效应力分布云图

13．生成滑动动画

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Animate Over Results 菜单命令，弹出 Animate Over Results 对话框，左侧选中 Stress，右侧选中 von Mises SEQV，Auto contour scaling 项选中 On，其他项保留默认设置，如图 19-36 所示，单击 OK 按钮，可查看滑块的滑动过程。

在放映过程中，执行 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Save Animation 菜单命令，输入要存储的文件名，即可存储动画。当观看完结果时，可单击 Animation Controller 对话框中的 Close 按钮，结束动画放映。

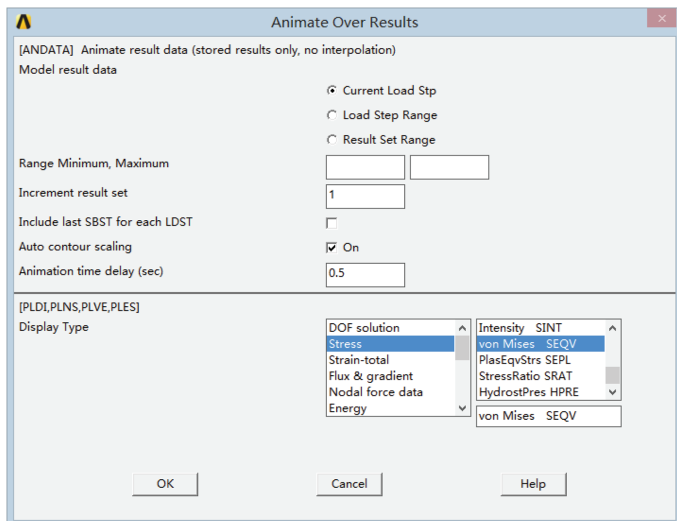


图 19-36 Animate Over Results 对话框

14．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。



19.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise19
/PREP7                          !进入前处理器
ET,1,PLANE223,11                !选择单元类型
MP,KXX,1,66.6                   !定义钢块导热系数
MP,C,1,460                      !定义钢块比热容
MP,DENS,1,7800                  !定义钢块密度
MP,EX,1,206e+9                  !定义钢块弹性模量
MP,ALPX,1,1.06e-5               !定义钢块热膨胀系数
MP,NUXY,1,0.3                   !定义钢块泊松比
MP,MU,1,0.2                     !定义钢块摩擦系数
UIMP,1,REFT,,,20                !定义热膨胀时的参考温度
RECT,,0.5,,0.125                !定义固定钢块矩形
RECT,,0.125,0.125,0.25          !定义滑动钢块矩形
ESIZE,0.025                     !定义单元尺寸
AMESH,ALL                       !给钢块划分单元
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.2
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,2,169
ET,3,172
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,0
RMORE,0
KEYOPT,3,1,1
! Generate the target surface
LSEL,S,,,3
CM,_TARGET,LINE
```

```
TYPE,2
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
LSEL,S,,,5
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,3
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION – END        !建立滑动钢块和固定钢块间的接触
/MREP,EPLOT
*DIM,Pre,TABLE,2,1,1,TIME,PRESSURE,      !定义压力载荷随时间变化的 TABLE 表
*SET,PRE(1,0,1) , 0
*SET,PRE(1,1,1) , 10000000
*SET,PRE(2,0,1) , 10
```

```
*SET,PRE(2,1,1) , 10000000
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,7
SFL,P51X,PRES, %PRE%              !给滑动钢块上表面施加压力载荷
TUNIF,30                          !给滑动钢块和固定钢块施加初始温度值
DA,1,UX                           !给固定钢块施加 X 方向约束
DA,1,UY                           !给固定钢块施加 Y 方向约束
DL,6, ,UX,0.375                   !对滑动钢块右侧线施加位移载荷
ALLSEL,ALL                        !选中所有模型
/SOL                              !进入求解器
ANTYPE,4                          !设置为瞬态分析
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
NLGEOM,1                          !定义大变形效应
TIME,3.75                         !定义求解时间
NSUBST,100,1000,100               !定义载荷步和载荷子步
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,10                     !定义结果输出子步间隔
KBC,0                             !设置为斜坡加载
AUTOTS,1                          !打开时间开关
NROPT,AUTO, ,OFF                  !设置牛顿-拉夫森求解选项
TOFFST,273,                       !设置温度偏移量
SOLVE                             !求解
FINISH
/POST1                            !进入后处理器
PLNSOL, TEMP,, 0,1.0              !显示温度分布云图
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 1,1.0              !显示等效应力分布云图
PLNS,S,EQV
ANDATA,0.5, ,0,0,0,1,0,1          !定义钢块滑动过程中的动画
FINISH
/EXIT,NOSAV                       !退出 ANSYS
```

19.3 本章小结

本章简单介绍了摩擦生热在 ANSYS 中的计算方法，通过两物体相互滑动过程的摩擦生热分析，详细讲述了摩擦生热的求解过程和边界条件施加方法，为读者进行摩擦生热分析提供参考和指导。

第20章 电 场 分 析

电场分析就是要计算导电系统或电容系统中的电场分布，在工程设计中有广泛应用，如汇流条、保险丝、传输线等。本章简单介绍采用 ANSYS 进行的电场分析以及进行电场分析的基本步骤。

学习目标

（1）了解电磁场分析的基础知识；

（2）掌握应用 ANSYS 进行电磁场分析的基本步骤和命令。

20.1 电场分析概述

对于电场分析，很多情况下需要先进行电流传导分析，或者同时进行热分析，以确定因焦耳热而导致的温度分布。也可以在电流传导分析之后直接进行磁场分析，以确定电流产生的磁场。本章主要介绍稳态电流传导分析、静电场分析和电路分析。

1．稳态电流传导分析

稳态电流传导分析可以分析计算直流电流和电压降产生的电流密度和电位分布。可以进行两种加载：电压和电流。稳态电流传导分析认为电压和电流呈线性关系，即电流与所加电压成正比。

2．静电场分析

静电场分析用以确定由电荷分布或外加电势所产生的电场和电场标量位（电压）分布。该分析能加两种形式的载荷：电压和电荷密度。静电场分析是假定为线性的，电场正比于所加电压。

3．电路分析

电路分析可以计算源电压和源电流在电路中引起的电压和电流分布。分析方法由源的类型来决定：

- 交流（AC）谐波分析。
- 直流（DC）静态分析。
- 随时间变化瞬态分析。

要在电磁学分析中用有限元来模拟全部电势，就必须提供足够的灵活性来模拟载流电磁设备。ANSYS 程序对于电路分析有如下性能：

- 用经过改进的基于节点的分析方法来模拟电路分析。
- 可以将电路与绕线圈和块状导体直接耦合。
- 二维和三维模型都可以进行耦合分析。
- 支持直流、交流和时间瞬态模拟。

ANSYS 程序中电路耦合模拟功能精确地模拟多种电子设备，如螺线管线圈变压器、交

流机械等。

电场分析用来确定导体或电容系统中的电场分布情况，包括以下典型量的分析。

（1）电场：Electric Field。

（2）电流密度：Current Density。

（3）电通量密度：Electric Flux Density。

（4）焦耳热：Joule Heat。

ANSYS 软件提供了大量单元用于不同类型的电场分析计算，见表 20-1。

表 20-1　电场分析单元汇总

类　型	单　元
线单元	LINK68
面单元	PLANE121；PLANE230
体单元	SOLID5；SOLID98；SOLID122；SOLID123；SOLID231；SOLID232；
壳单元	SHELL157
特殊单元	MATRIX50；INFIN110；INFIN111
电路单元	CIRCU94；CIRCU124；CIRCU125；

20.2　电场分析基本步骤

和热分析及应力分析类似，采用 ANSYS 软件进行电场分析主要包括以下 3 个步骤。

（1）前处理：建立有限元模型。

（2）求解：施加载和计算。

（3）后处理：查看计算结果。

1．建模

（1）确定 jobname、title、unit。

（2）进入 PREP7 前处理，定义单元类型，设置单元选项。

（3）定义单元实常数。

（4）定义材料电性能参数。

（5）创建几何模型并划分网格，或直接建立有限元模型。

2．施加载荷计算

（1）定义分析类型。如果进行新的热分析，执行 Main Menu→Solution→Analysis Type →New Analysis 菜单命令，选中 Steady-State；如果增加边界条件后继续上一次分析，则执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Restart 菜单命令。

（2）施加载荷。对于稳态导电分析，主要有电流值和电压值两种载荷。

（3）确定载荷步选项。

（4）确定分析选项。

（5）求解。

3．查看结果

（1）进入后处理器。

（2）使用绘图或列表查看结果。

（3）查看误差估计。

（4）验证求解。

20.3 实例1——导电圆盘的电场分布分析

20.3.1 问题描述

一个圆盘如图20-1所示，半径a=20 cm，电流自半径 b=10 cm，ϕ=0的位置流入，自半径 b=10 cm，ϕ=π的位置流出，电流值为1 mA，圆盘电阻率为100 Ω·m。试查看圆盘的电流密度和电势分布情况。

20.3.2 问题分析

为了获得精确解，圆盘区域须划分比较密的网格，选用导电面单元PLANE230，并划分为三角形网格。在圆心位置定义零电势，在电流流入点和流出点定义电流值。为了方便建模，采用柱坐标系。

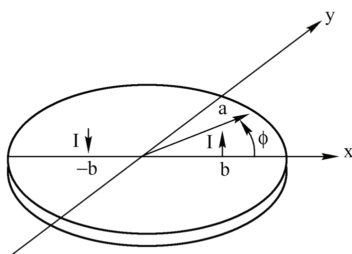


图20-1 导电圆盘示意图

20.3.3 GUI操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise20-1”，单击OK按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Elec Conduction 和 2D Quad 230，4节点二维平面单元，如图20-2所示，单击OK按钮。

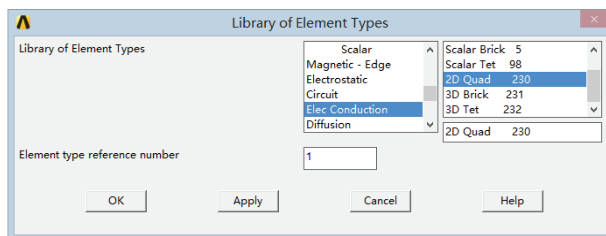


图20-2 Library of Element Types 对话框

3．定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

```
a=20.e-2          ! disk radius, m
b=10.e-2          ! electrode distance from the center, m
I=1.e-3           ! current, A
```

4．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available →Electromagnetics→Resistivity→Constant 菜单命令，如图 20-3 所示，弹出 Resistivity for Material Number 1 对话框，RSVX 项设为 100，如图 20-4 所示，单击 OK 按钮。

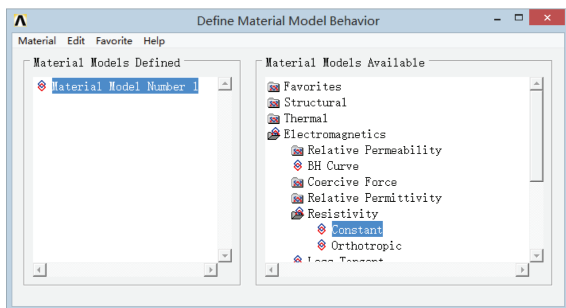


图 20-3　Define Material Model Behavior 对话框

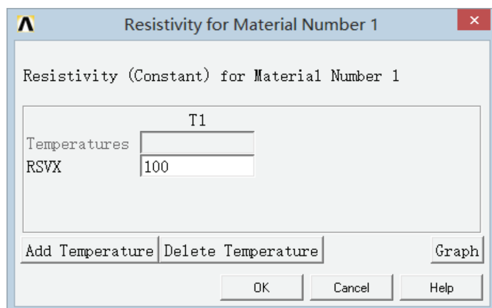


图 20-4　Resistivity for Material Number 1 对话框

定义完材料参数后，关闭材料属性定义对话框。

5．建立几何模型

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Circle→Partial Annulus 菜单命令，弹出 Part Annular Circ Area 对话框，依次输入 0、0、0、0、a、360，如图 20-5 所示，单击 OK 按钮。

6．设置单元密度并划分网格

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→MeshTool 菜单命令，弹出 MeshTool 对话框，如图 20-6 所示。在 Size Controls 选项组的 Global 项单击 Set 按钮，弹出 Global Element Sizes 对话框，NDIV 项设为 64，如图 20-7 所示，单击 OK 按钮。

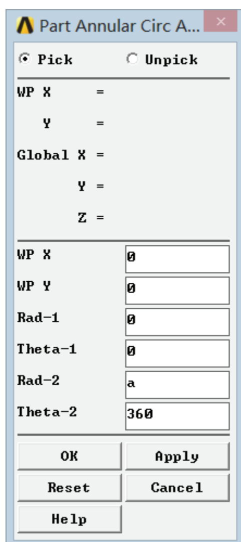


图 20-5　Part Annular Circ Area 对话框

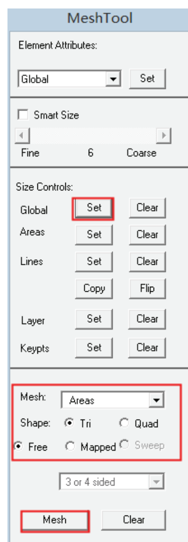


图 20-6　MeshTool 对话框

在图 20-6 所示的 MeshTool 对话框中，依次在 Mesh 项选中 Areas，Shape 项选中 Tri，选中 Free，单击 Mesh 按钮，弹出 Mesh Areas 对话框，单击 Pick All 按钮生成有限元模型，如图 20-8 所示。

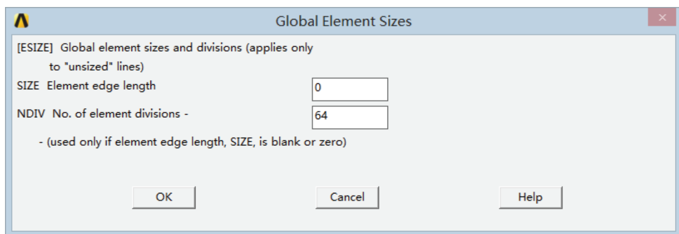


图 20-7　Global Element Sizes 对话框

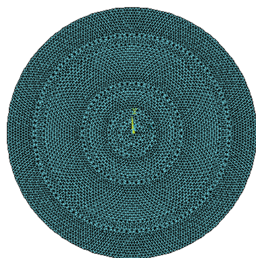


图 20-8　建立有限元模型

完成网格划分后，在 MeshTool 对话框中单击 Close 按钮。

7. 施加边界条件

（1）激活柱坐标系。执行 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cylindrical 菜单命令，激活全局柱坐标系。

（2）施加电势边界条件。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Nodes 菜单命令，弹出 Apply VOLT on Nodes 对话框，依次选中 Single 和 List of Items，输入“Node(0,0,0)”，如图 20-9 所示，单击 OK 按钮，弹出 Apply VOLT on nodes 对话框，选中 Constant value 项，并输入“0”，如图 20-10 所示，单击 OK 按钮。

提示：Node(x,y,z)返回参数为位置最接近坐标值(x,y,z)的节点值。

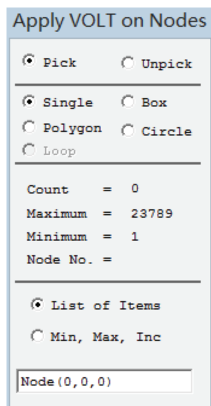


图 20-9　Apply VOLT on Nodes 对话框

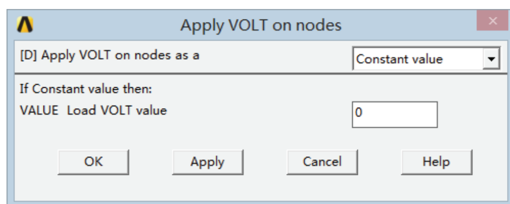


图 20-10　Apply VOLT on nodes 对话框

继续执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Apply→Electric→Boundary→Excitation→Current→On Nodes 菜单命令，弹出 Apply AMPS on Nodes 对话框，依次选中 Single 和 List of Items，输入“Node(b,0,0)”，如图 20-11 所示，单击 OK 按钮，弹出 Apply AMPS on nodes 对话框，选中 Constant value 项，并输入“-I”，如图 20-12 所示，单击 OK 按钮。

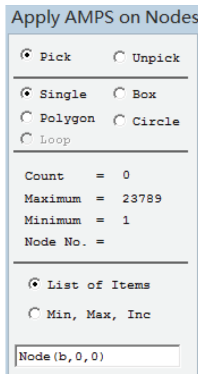


图 20-11 Apply AMPS on Nodes 对话框

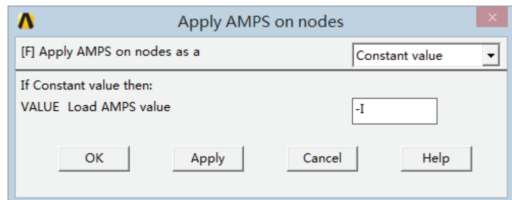


图 20-12 Apply VOLT on nodes 对话框

继续执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Apply→Electric→Boundary→Excitation→Current→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，依次选中 Single 和 List of Items，输入“Node(b,180,0)”，单击 OK 按钮，弹出 Apply AMPS on nodes 对话框，选中 Constant value 项，并输入“I”，单击 OK 按钮。

提示： 对于柱坐标系，坐标值(x,y,z)中，x 为半径值，y 为角度值，z 为高度值。

8．设置求解选项

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Steady-State，单击 OK 按钮

9．求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 STATUS Command 和 Solve Current Load Step 对话框，审核 STATUS Command 文件中的模型信息，确定正确后，单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮，程序开始进行计算。

计算完成后，程序弹出 Solution is done 的信息提示框，提示计算完成。单击 Close 按钮关闭计算窗口，并进行存盘。

10．显示结果分布云图

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示电势分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选择 Electric potential 项，如图 20-13 所示，单击 OK 按钮。所得电势分布云图如图 20-14 所示。

（3）显示电流密度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选择 conduction current density vactor sum 项，如图 20-15 所示，单击 OK 按钮。所得电势分布云图如图 20-16 所示。

11．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。



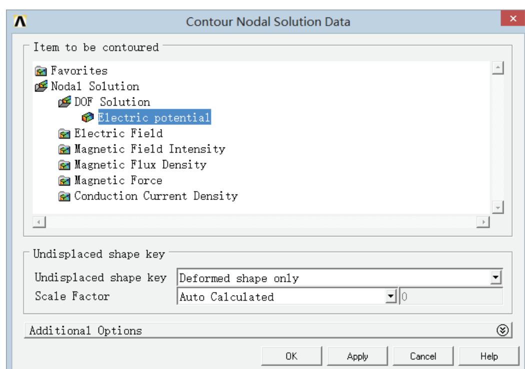


图 20-13　Contour Nodal Solution Data 对话框 1

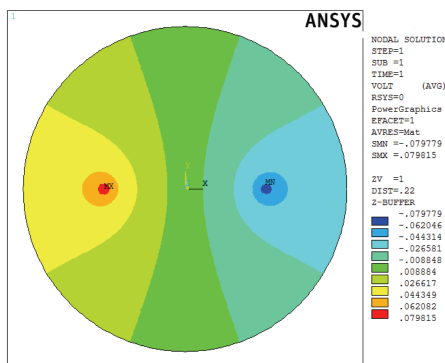


图 20-14　圆盘电势分布云图

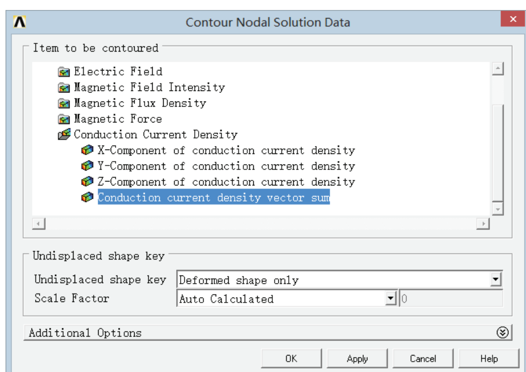


图 20-15　Contour Nodal Solution Data 对话框 2

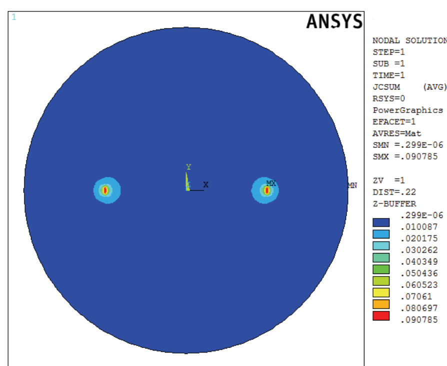


图 20-16　圆盘电流密度分布云图

20.3.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise20-1
/PREP7
a=20.e-2                !圆盘半径, m
b=10.e-2                !电极距中心距离, m
I=1.e-3                 !电流值, A
! 建模和划分网格
et,1,PLANE230           !定义单元类型
mp,rsvx,1,100           !定义电阻材料属性
cyl4,0,0,0,0,a,360      !建立圆盘平面
esize,,64
msha,1,2-D              !采用三角形网格
amesh,1
! 边界条件
csys,1                  !柱坐标系
d,node(0,0,0),volt,0    !圆心位置节点定义零电势
! Nodal current loads
f,node(b,0,0),amps,-I   !电极位置处定义电流值
```

```
f,node(b,180,0),amps,I     !电极位置处定义电流值
fini
/solu
antype,static              !定义为稳态分析
solve
fini
/post1
plnsol,volt                !显示电势分布云图
plnsol,jc,sum              !显示电量密度分布云图
/EXIT,NOSAV                !退出 ANSYS
```

20.4 实例 2——屏蔽带状传输线静电场分析

20.4.1 问题描述

图 20-17 所示为屏蔽带状传输线截面示意图。已知几何参数 $a=10$ cm， $w=1$ cm， 空气的相对介电常数 $\varepsilon_r=1$， 基底的相对介电常数 $\varepsilon_r=10$ 。载荷为 $V_1=1.5$ V， $V_0=0.5$ V 。分析电场分布、电位分布、单位长度储能及电容量。

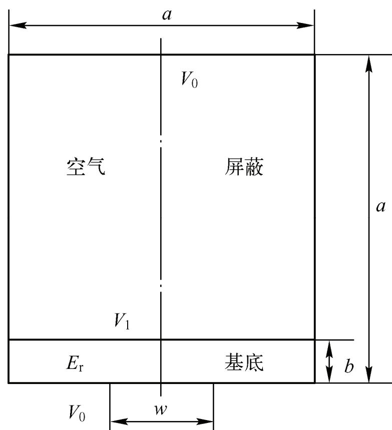


图 20-17 几何模型示意图

20.4.2 问题分析

本问题属于典型的电场分析问题，由于模型左右对称，因此可只进行右半边的分析。模型相对比较简单，因此通过 ANSYS 的前处理建模模块完成建模即可。单元选用 PLANE121 单元，采用国际单位制。

20.4.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise20-2”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Electrostatic 和 2D Quad 121，4 节点二维平面单元，如图 20-18 所示，单击 OK 按钮。

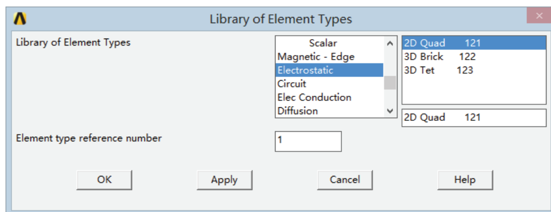


图 20-18 Library of Element Types 对话框

3．定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

V0=0.5
V1=1.5

4．定义材料属性

（1）定义空气的介电常数。

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Electromagnetics→Relative Permittivity→Constant 菜单命令，如图 20-19 所示，弹出 Resistive Permittivity for Material Number 1 对话框，PERX 项设为 1，如图 20-20 所示，单击 OK 按钮。

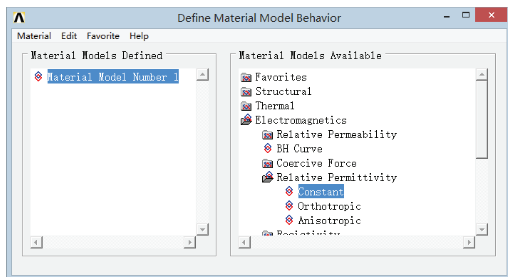


图 20-19　Define Material Model Behavior 对话框

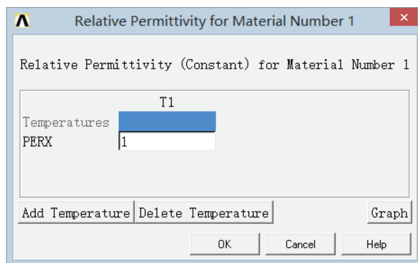


图 20-20　Resistive Permittivity for Material Number 1 对话框

（2）定义基底的介电常数。

创建新材料。在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，材料号默认为 2，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 2 的定义。

选中 Material Model Number 2，执行 Material Models Available→Electromagnetics→Resistive Permittivity→Constant 菜单命令，弹出 Resistive Permittivity for Material Number 2 对话框，PERX 项设为 10，单击 OK 按钮。

5．建立几何模型

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Rectangle by Dimensions 对话框，依次输入 0、0.5、0、1，如图 20-21 所示，单击 Apply 按钮。

继续在 Create Rectangle by Dimensions 对话框中依次输入矩形的角点坐标如下：

X1=0.5，X2=5，Y1=0，Y2=1

X1=0，X2=0.5，Y1=1，Y2=10

X1=0.5，X2=5，Y1=1，Y2=10

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮，将所有的面粘接。生成 4 个矩形，如图 20-22 所示。

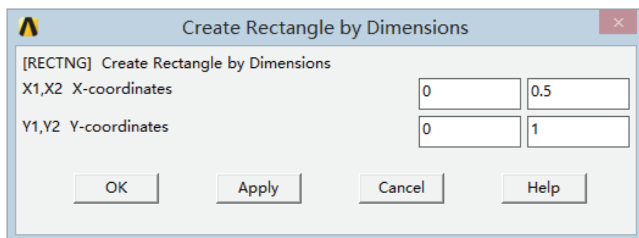


图 20-21 Create Rectangle by Dimensions 对话框

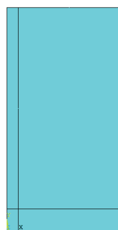


图 20-22 生成 4 个矩形

执行 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers 菜单命令，弹出 Compress Numbers 对话框，如图 20-23 所示，选中 Areas 项，单击 OK 按钮。

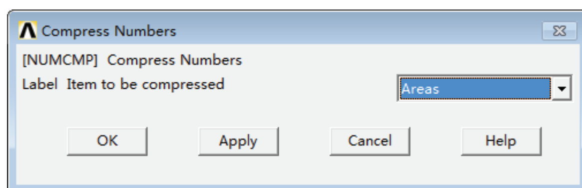


图 20-23 Compress Numbers 对话框

执行 Utility Menu→Plot Ctrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，AREA 项设置为 On，如图 20-24 所示，单击 OK 按钮，在工作区显示面编号如图 20-25 所示，单击 OK 按钮。

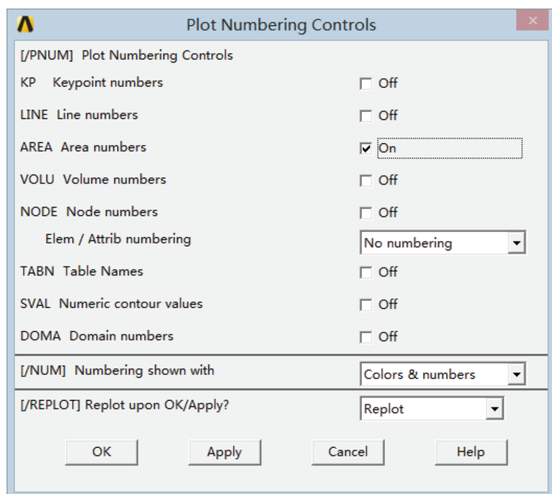


图 20-24 Plot Numbering Controls 对话框

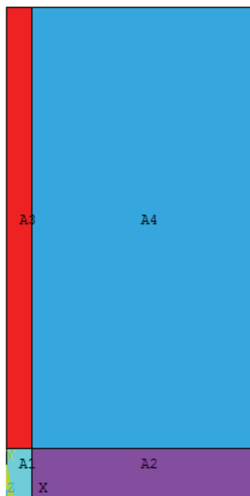


图 20-25 面编号示意图

6．设置单元属性并划分网格

（1）设置单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 1 号面与 2 号面，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 2，如图 20-26 所示，单击 OK 按钮。

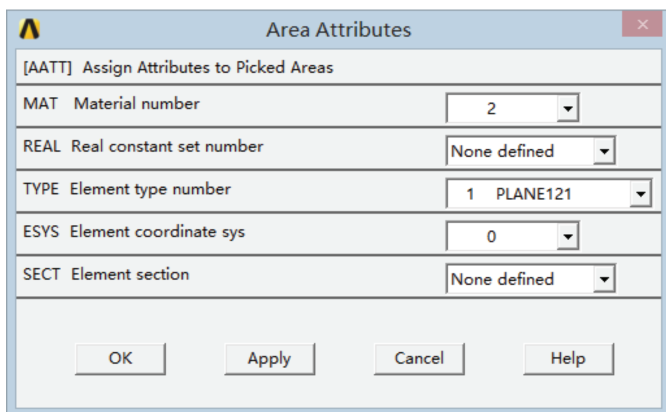


图 20-26 Area Attributes 对话框

继续执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 3 号面与 4 号面，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 1，单击 OK 按钮。

（2）设置单元尺寸。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置为 Lines、By Location、Y coordinates、1、From Full，如图 20-27 所示，单击 Apply 按钮，再依次设置为 Lines、By Location、X coordinates、0.25、Reselect，如图 20-28 所示，单击 OK 按钮。

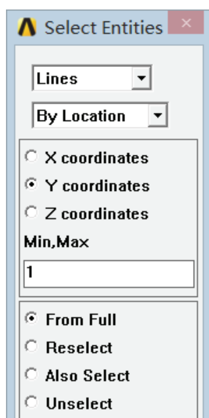


图 20-27 Y 坐标设置对话框

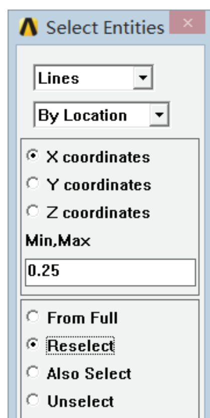


图 20-28 X 坐标设置对话框

选中线在 GUI 界面中为 3 号线，注意核对线号以防错选。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Element Sizes on Picked Lines 对话框，NDIV 项设为 8，如图 20-29 所示，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Basic 菜单命令，弹出 Basic SmartSize Settings 对话框，LVL 项设为 3，如图 20-30 所示，单击 OK 按钮。

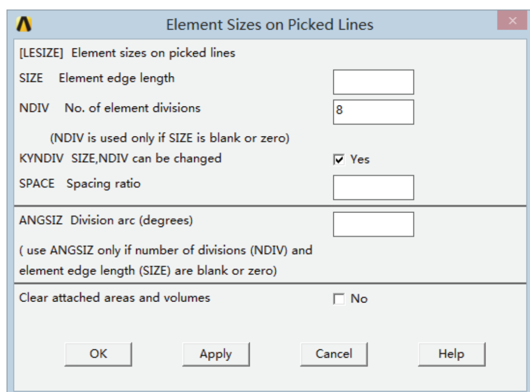


图 20-29 Element Sizes on Picked Lines 对话框

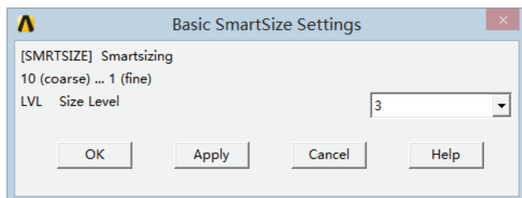


图 20-30 Basic SmartSize Settings 对话框

（3）划分网格。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Free 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，Elem/Attrib numbering 项选中 Material numbers，如图 20-31 所示，单击 OK 按钮，显示网格划分完成后效果如图 20-32 所示。

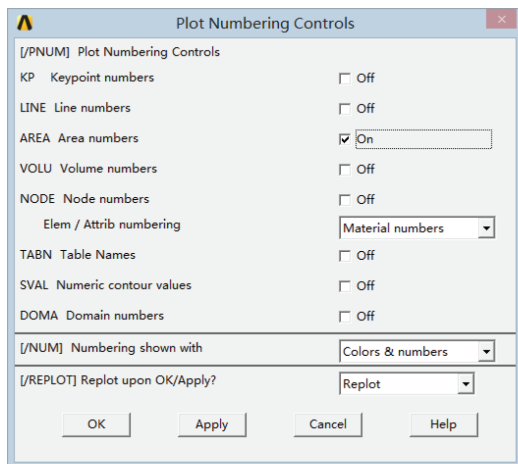


图 20-31 Plot Numbering Controls 对话框

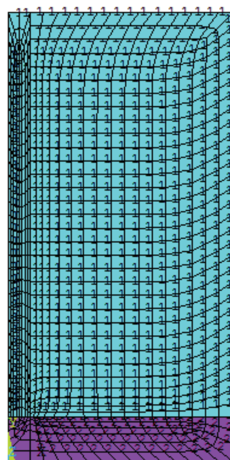


图 20-32 网格划分效果图

7. 定义电势边界条件

（1）施加电势 V1。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置为 Lines、By Location、Y coordinates、1、From Full，单击 Apply 按钮，再依次设置为 Lines、By Location、X coordinates、0.25、Reselect，单击 OK 按钮，选中 3 号线。

再次执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置为 Nodes、Attached to、Lines,all、From Full，如图 20-33 所示，单击 OK 按钮，选中 3 号线上的所有节点。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On

Nodes 菜单命令，弹出 By Nodes 对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply VOLT on nodes 对话框，输入电压值为 V1，如图 20-34 所示，单击 OK 按钮，显示电势 V1 施加效果如图 20-35 所示。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

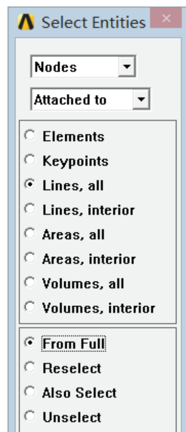


图 20-33　Select Entities 对话框

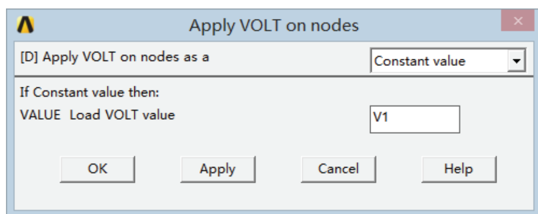


图 20-34　Apply VOLT on nodes 对话框

（2）施加电势 V0。

选取 Y=0 的节点、Y=10 的节点以及 X=5 的节点。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置为 Nodes、By Location、X coordinates、5、From Full，如图 20-36 所示，单击 Apply 按钮。

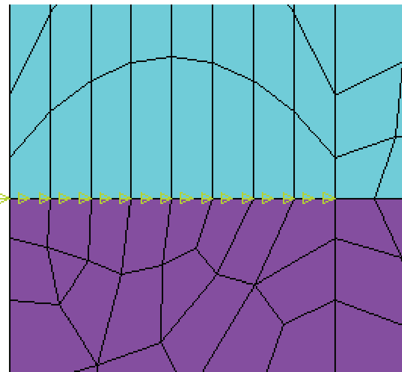


图 20-35　电势 V1 施加效果图

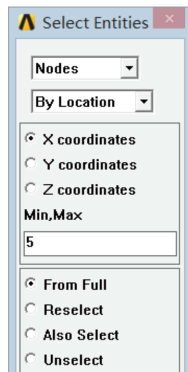


图 20-36　Select Entities 对话框

再依次设置为 Nodes、By Location、Y coordinates、0、Also Reselect，单击 Apply 按钮。

再依次设置为 Nodes、By Location、Y coordinates、10、Also Reselect，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply VOLT on nodes 对话框，输入电压值 V0，单击 OK 按钮，显示电势 V0 施加效果如图 20-37 所示。

（3）显示总体电势施加效果图。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Utility Menu→Plot→Nodes 菜单命令，显示总体电势施加效果如图 20-38 所示。



图 20-37 电势 V0 施加效果图

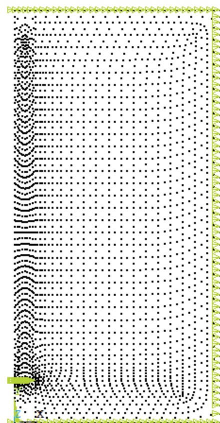


图 20-38 总体电势施加效果图

8. 计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 按钮关闭提示框。

9. 进行后处理

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）定义矢量数组。

执行 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table 菜单命令，弹出 Element Table Data 对话框，如图 20-39 所示，单击 Add 按钮，弹出 Define Additional Element Table Items 对话框，Lab 项设为 SENE，Item，Comp 项依次选择 Energy 和 Elec energy SENE，如图 20-40 所示，单击 Apply 按钮。

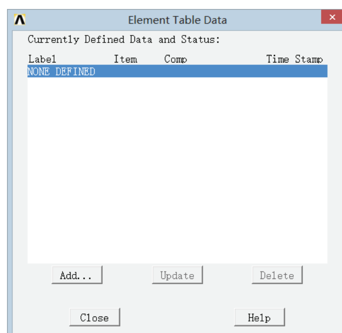


图 20-39 Element Table Data 对话框

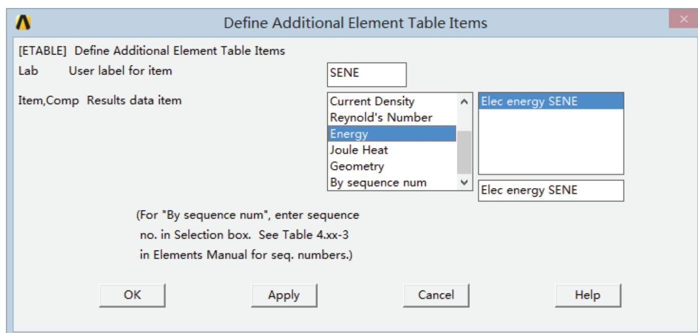


图 20-40 SENE 定义

继续定义 Element Table。Lab 项设为 EFX，选择 Flux&gradient 和 Elec Field EFX，如图 20-41 所示，单击 Apply 按钮；Lab 项设为 EFY，选择 Flux&gradient 和 Elec Field EFY，

如图 20-42 所示，单击 OK 按钮，完成定义的 Element Table Data 对话框如图 20-43 所示。

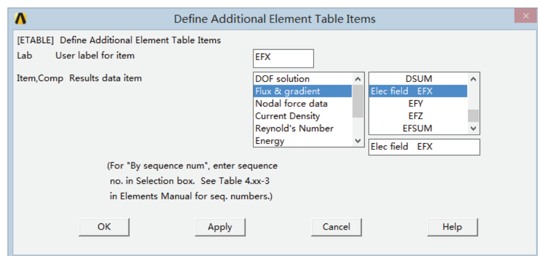


图 20-41　EFX 定义 1

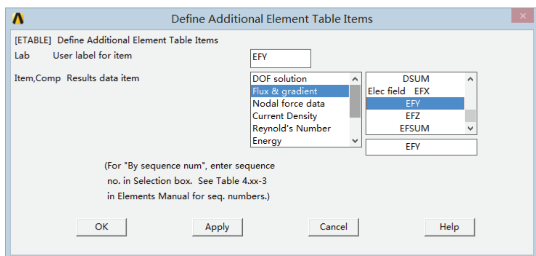


图 20-42　EFY 定义 2

（3）显示电势分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选择 DOF Solution→Electric potential，单击 OK 按钮，显示模型的电势分布云图如图 20-44 所示。

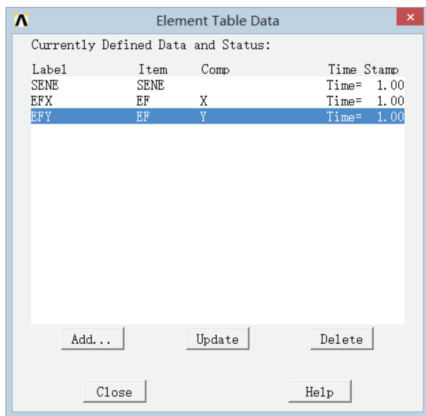


图 20-43　完成单元表定义

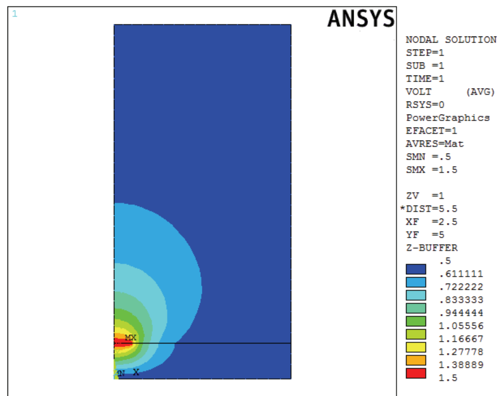


图 20-44　电势分布云图

（4）显示自定义矢量分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Vector Plot→User-defined 菜单命令，弹出 Vector Plot of User-defined Vectors 对话框，Item 项设为 EFX，Lab2 项设为 EFY，如图 20-45 所示，单击 OK 按钮，自定义矢量显示云图如图 20-46 所示。

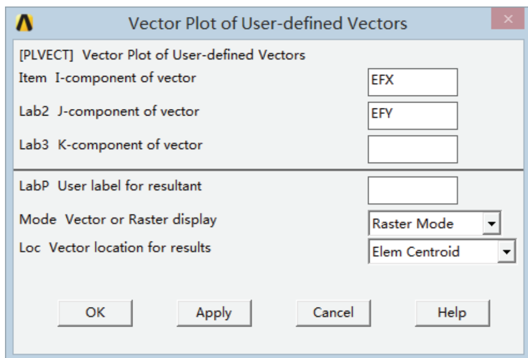


图 20-45　Vector Plot of User-defined Vectors 对话框

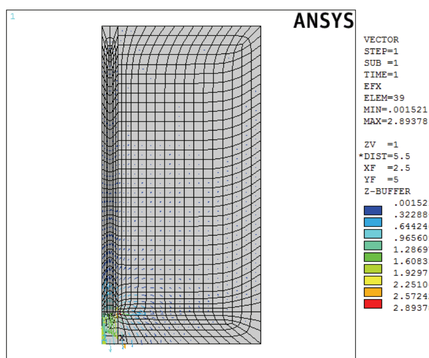


图 20-46　自定义矢量显示云图

（5）求解总能量。执行 Main Menu→General Postproc→Element Table→Sum of Each Item 菜单命令，弹出 Tabular Sum of Each Element Table Item 对话框，如图 20-47 所示，单击 OK 按钮。

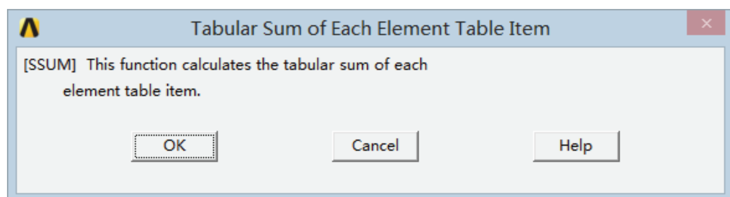


图 20-47　Tabular Sum of Each Element Table Item 对话框

在命令输入框中运行如下命令：

```
*GET,W,SSUM,,ITEM,SENE
C=(W*2)/((V1-V0)**2)
C=((C*2)*1E12)
```

由上述公式求出 C 的值。执行 Utility Menu→List→Status→Parameters→All Parameters 菜单命令，弹出*STAT Command 窗口，如图 20-48 所示。

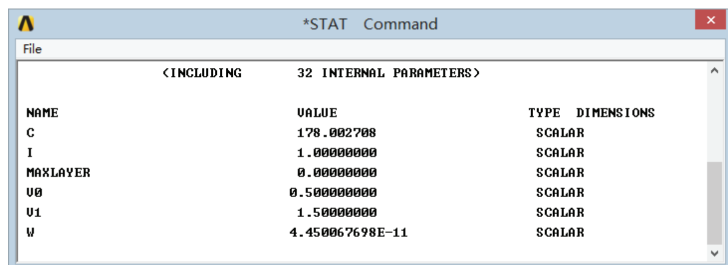


图 20-48　*STAT Command 窗口

图 20-48 所示的*STAT Command 窗口中显示了所要求的电容值。

10．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

20.4.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise20-2
/PREP7
ET,1,PLANE121
V0=0.5
V1=1.5
MP,PERX,1,1
MP,PERX,2,10
```

```
RECTNG,0,0.5,0,1,
RECTNG,0.5,5,0,1,
RECTNG,0,0.5,1,10,
RECTNG,0.5,5,1,10,
FLST,2,4,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
AGLUE,P51X
NUMCMP,AREA
ASEL,S,,,1,2
AATT,       2, ,    1,       0,
ASEL,S,,,3,4
AATT,       1, ,    1,       0,
LSEL,S,LOC,Y,1
LSEL,R,LOC,X,0.25
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,8, , , , ,1
!*
ALLSEL,ALL
SMRTSIZE,3
MSHKEY,0
AMESH,ALL
/SOLVE
LSEL,S,LOC,Y,1
LSEL,R,LOC,X,0.25
NSLL,S,1
D,ALL,VOLT,V1
ALLSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,5
NSEL,A,LOC,Y,0
NSEL,A,LOC,Y,10
D,ALL,VOLT,V0
ALLSEL,ALL
SOLVE
/POST1
/EFACET,1
PLNSOL, VOLT,, 0
ETABLE,SENE,SENE,
ETABLE,EFX,EF,X
ETABLE,EFY,EF,Y
```

```
/EFACET,1
PLNSOL, VOLT,, 0
PLVECT,EFX,EFY, , ,RAST,ELEM
SSUM
*GET,W,SSUM,,ITEM,SENE
*SET,C,(W*2)/((V1-V0)**2)
*SET,C,((C*2)*1E12)
*STAT
FINISH
SAVE
/QUIT
```



20.5 本章小结

ANSYS 除了可以进行结构分析和热分析，还可以进行电磁场分析。本章主要对电场分析进行了详细的介绍，包括电场分析的基础理论和基本分析步骤，通过两个实例的详细讲解，帮助读者掌握在 ANSYS 计算平台上进行电场分析的方法和步骤。

第21章 磁 场 分 析

ANSYS 以 Maxwell 方程组作为电磁场分析的出发点，计算的未知量（自由度）主要是磁位或通量，其他关心的物理量可以由这些自由度导出。本章对 ANSYS 电磁场的基础知识进行了分类介绍，并通过两个实例讲解了磁场计算的主要流程。

学习目标

（1）了解电磁场分析的基础知识;

（2）掌握棱边单元法进行磁场分析的方法。

21.1 概述

ANSYS 可分析计算下列设备中的电磁场，如电力发电机、磁带及磁盘驱动器、变压器、波导、螺线管传动器、谐振腔、电动机、连接器、磁成像系统、天线辐射、图像显示设备传感器、滤波器、回旋加速器等。

在一般电磁场分析中所涉及的典型的物理量有磁通密度、能量损耗、磁场强度、磁漏、磁力及磁矩、S-参数、阻抗、品质因子 Q、电感、回波损耗、涡流、本征频率等，存在电流、永磁体和外加场都会激励起需要分析的磁场。

21.1.1 磁场分析分类

ANSYS 可以进行的磁场分析有如下类型。

- 二维静态磁场分析：分析直流电（DC）或永磁体所产生的磁场，用矢量位方程。
- 二维谐波磁场分析：分析低频交流电流（AC）或交流电压所产生的磁场，用矢量位方程。
- 二维瞬态磁场分析：分析随时间任意变化的电流或外场所产生的磁场，包含永磁体的效应，用矢量位方程。
- 三维静态磁场分析：分析直流电或永磁体所产生的磁场，用标量位方法。
- 三维静态磁场分析：分析直流电或永磁体所产生的磁场，用棱边单元法。
- 三维谐波磁场分析：分析低频交流电所产生的磁场，用棱边单元法。建议尽量用这种方法求解谐波磁场分析。
- 三维瞬态磁场分析：分析随时间任意变化的电流或外场所产生的磁场，用棱边单元法。建议尽量用这种方法求解谐波磁场分析。
- 基于节点方法的三维静态磁场分析：用矢量位方法。
- 基于节点方法的三维谐波磁场分析：用矢量位方法。

■ 基于节点方法的三维瞬态磁场分析：用矢量位方法。

三维分析就是用三维模型模拟被分析的结构。实际应用中大多数结构需要三维模型来进行模拟。然而，三维模型对建模的复杂度和计算的时间都有较高要求。所以，若有可能，应尽量考虑用二维模型来进行建模求解。

21.1.2 计算方法

电磁场分析所用到的方法主要有棱边单元、标量位、矢量位方法，以下进行简要介绍以供读者参考。

1．棱边单元法

棱边单元法是 ANSYS 提供的基于单元的求解方法。在解决大多数的三维时谐问题和瞬态问题时，推荐选用棱边单元法，但此方法对于二维问题不适用。

棱边单元法中的自由度与单元边有关系，而与单元节点没关系。此方法在三维低频静态和动态电磁场的模拟仿真方面有很好的求解能力。

这种方法和基于节点的矢量位法同时求解具有相同泛函表达式的模型时，此方法更精确，特别是当模型中有铁区存在时。在自由度是变化的情况下，棱边单元法比基于节点的矢量位方法更有效。

2．磁标量位法

对于大多数三维静态分析应尽量使用标量位方法。此方法将电流源以基元的方式单独处理，无需为其建立模型和划分有限元网格。由于电流源不必成为有限元网格模型中的一部分，因此建立模型更容易。标量位方法具有以下特点。

■ 支持六面体、楔型、金字塔型、四面体单元。

■ 电流源以基元的方式定义（线圈型、杆型、弧型）。

■ 可含永久磁体激励。

■ 求解线性和非线性导磁率问题。

■ 可使用节点耦合和约束方程。

此外，标量位方法中电流源建模简单，因为用户只需在合适的位置施加电流源基元（线圈型、杆型等）就可以模拟电流对磁场的影响。

3．磁矢量位法

矢量位方法（MVP）是 ANSYS 支持的两种基于节点的方法中的一种（标量位法是另一种基于节点的方法）。这两种方法都可用于求解三维静态、时谐、瞬态分析。

矢量位方法中的每个节点的自由度要比标量位方法多，因为它在 X、Y 和 Z 方向分别具有磁矢量位 AX、AY、AZ。在载压或电路耦合分析中还引入了另外 3 个自由度：电流（CURR）、电压降（EMF）和电压（VOLT）。二维静态磁分析必须采用矢量位方法，此时主自由度只有 AZ。

在矢量位方法中，电流源（电流传导区域）要作为整个有限元模型的一部分。由于它的节点自由度更多，所以比标量位方法的运算速度要慢一些。

矢量位方法可应用于三维静态、时谐和瞬态的磁场分析计算。但是当计算区域含有导磁材料时，该方法的精度会有损失（因为在不同导磁率材料的分界面上，矢量位的法向分量非常大，影响了计算结果的精度）。

21.2 实例——电磁沟槽电磁力分析

21.2.1 问题描述

计算在交流情况下电机沟槽的磁场、能量、焦耳热损耗和受力情况。电机沟槽的几何模型如图 21-1 所示，沟槽在电机转子中的位置如图 21-2 所示。

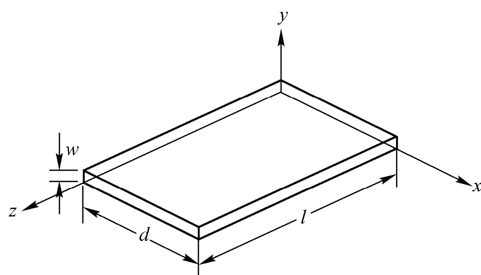


图 21-1 几何模型

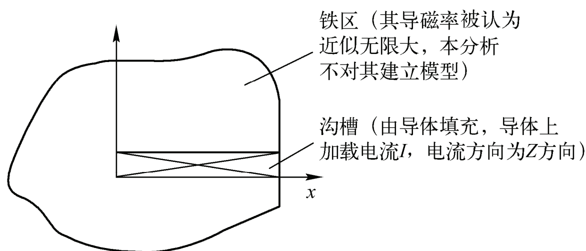


图 21-2 沟槽中电机转子示意图

模型的参数如表 21-1 所示。

表 21-1 模型参数表

几何特性	材料特性
l=0.3 m	m_r=1.00
d=0.1 m	r=1E-8 W·m
W=0.01 m	

导体中的电流为 2236 A，相位角为 26.57°，对应的复数形式为 2000+j1000 A，分析频率为 3 Hz。

21.2.2 问题分析

该问题属于典型的磁场分析，选择单元 SOLID236 进行分析。假定模型中沟槽顶部和底部的铁材料是理想的，可加磁力线垂直条件，这无需设置，程序会自动满足。分析时，采用国际单位制。

21.2.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise21-1”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，弹出 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Magnetic Vector 和 Brick 20node 236，20 节点六面体磁单元，如图 21-3 所示，单击 OK 按钮。

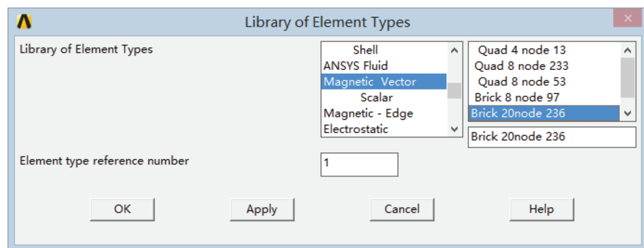


图 21-3 Library of Element Types 对话框

3．定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

l=0.3
d=0.1
w=0.01
mur=1
rho=1.0e-8
fr=3
curr=2000.0
curi=1000.0
n=20
pi=3.1415926
mu0=pi*4.0e-7

完成定义的参数如图 21-4 所示，通过 Utility Menu→ Parameters→ Scalar Parameters 菜单命令查看。

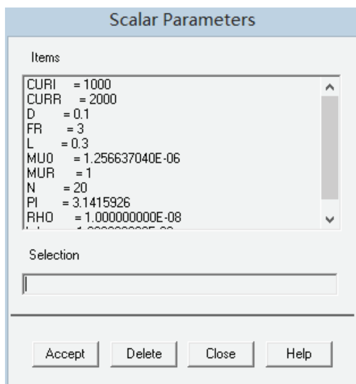


图 21-4 Scalar Parameters 对话框

4．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Electromagnetics→Resistivity→Constant 菜单命令，弹出 Resistivity for Material Number 1 对话框， RSVX 项设为 IE-008，如图 21-5 所示，单击 OK 按钮。

继续执行 Material Models Available→Relative Permeability→Constant 菜单命令，弹出 Permeability for Material Number 1 对话框， NURX 项设为 1，如图 21-6 所示，单击 OK 按钮。



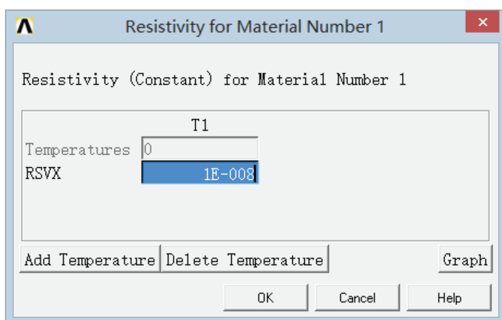


图 21-5　相对电阻率

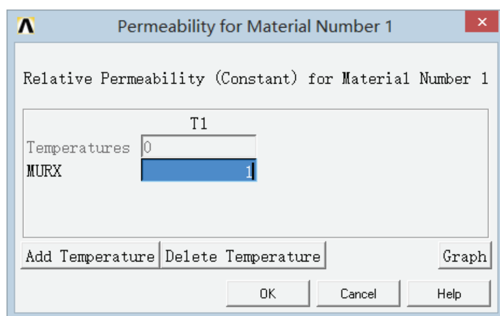


图 21-6　相对磁导率

5．建立几何模型

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Block by Dimensions 对话框，依次输入（0,d）（0,w）（0,l），如图 21-7 所示，单击 OK 按钮。所建立的体模型如图 21-8 所示。

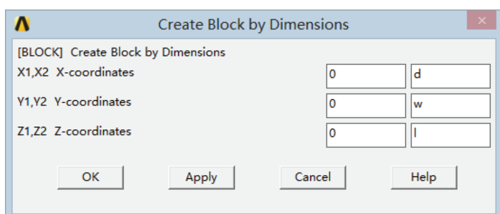


图 21-7　Create Block by Dimensions 对话框

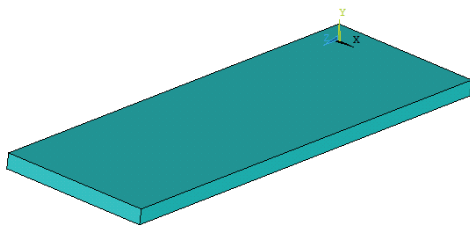


图 21-8　生成几何模型

6．设置单元密度并划分网格

（1）设置线网格密度。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设为 Lines、By Location、X coordinates、d/2、From Full，如图 21-9 所示，单击 OK 按钮，选中的线如图 21-10 所示。



图 21-9　Select Entities 对话框



图 21-10　选中的线

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All Lines 菜单命令，弹出 Element Sizes on All Selected Lines 对话框， NDIV 项设为 n，如图 21-11 所

示，单击 OK 按钮，线尺寸如图 21-12 所示。

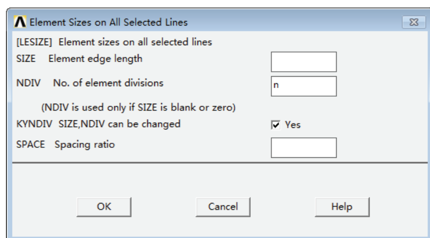


图 21-11 Element Sizes on All Selected Lines 对话框



图 21-12 定义单元尺寸

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，单击 Invert 按钮，反选剩余的线。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All Lines 菜单命令，弹出 Element Sizes on All Selected Lines 对话框， NDIV 项设为 1，单击 OK 按钮。

完成全部尺寸定义的模型如图 21-13 所示。执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令选取所有模型。

（2）划分网格。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volumes→Mapped→4 to 6 sided 菜单命令，弹出体拾取对话框，拾取模型，单击 OK 按钮，完成网格划分的效果如图 21-14 所示。

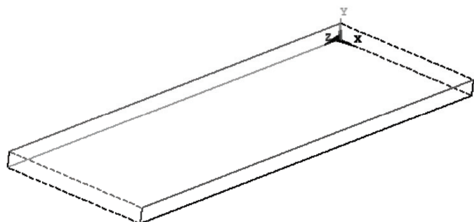


图 21-13 定义单元尺寸

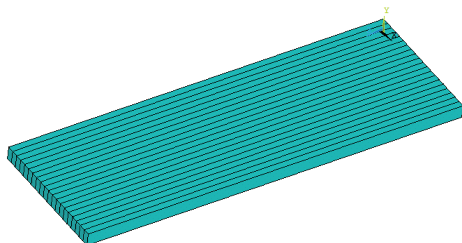


图 21-14 网格划分效果图

7．设置求解选项

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Harmonic 单选按钮，如图 21-15 所示，单击 OK 按钮

执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq and Substeps 菜单命令，弹出 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框，设置谐波频为 0~fr，如图 21-16 所示，单击 OK 按钮。

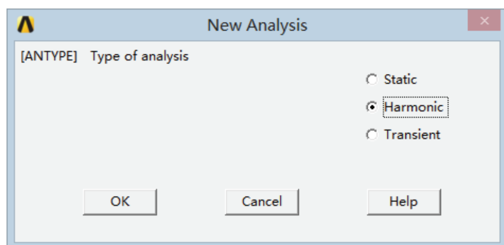


图 21-15 New Analysis 对话框

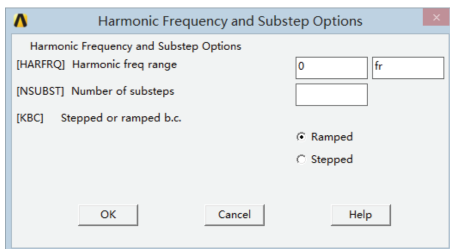


图 21-16 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框

8. 施加边界条件

（1）施加零磁势。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置为 Nodes、By Location、X coordinates、d、From Full，如图 21-17 所示，单击 Apply 按钮，再选中 X coordinates，输入 0，选中 Also Selected，单击 Apply 按钮，再输入 l（字母），选中 Also Selected，单击 Apply 按钮，单击 Plot，工作区中显示此时选中的节点，如图 21-18 所示。

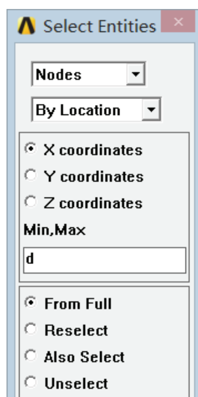


图 21-17　Select Entities 对话框

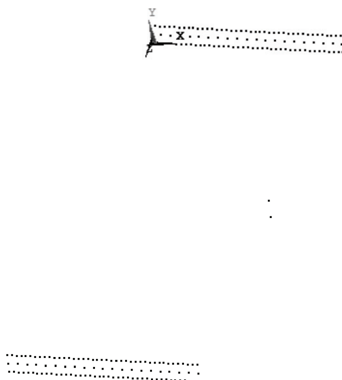


图 21-18　选中的节点

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→VectorPot→Flux Par'l→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply A on nodes 对话框，选中 AZ，单击 OK 按钮，完成的约束如图 21-19 所示。

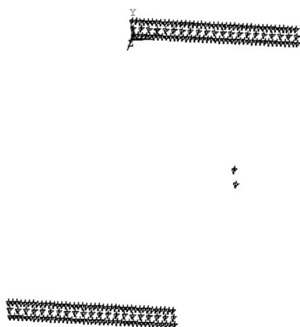


图 21-19　施加矢量磁势约束

（2）施加零电位。执行 Utility Menu→Select→Entities 命令菜单，弹出 Select Entities 对话框，依次设置为 Nodes、By Location、Z coordinates、0、From Full，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→TimeIntegrated→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply VOLT on nodes 对话框，如图 21-20 所示，单击 OK 按钮，电势和磁边界条件如图 21-21 所示。

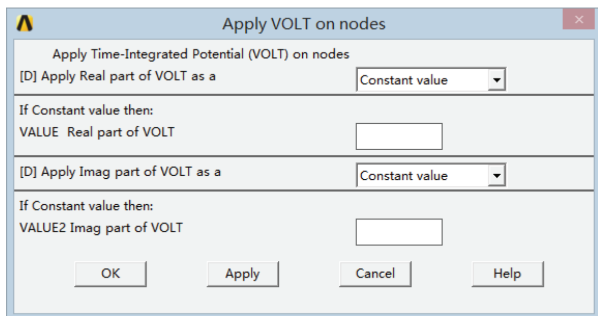


图 21-20　Apply VOLT on nodes 对话框

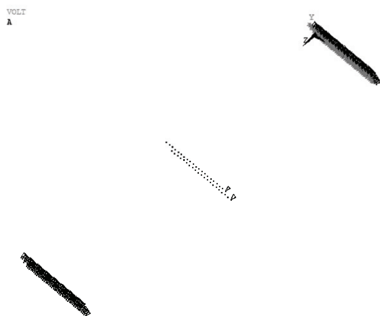


图 21-21　电势和磁势边界条件

（3）定义约束条件。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次设置为 Nodes、By Location、Z coordinates、l、From Full，单击 OK 按钮，选择 Z 坐标为 l（字母）的所有节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Couple DOFs 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Define Coupled DOFs 对话框， NSET 项默认为 1，Lab 项选中 VOLT，单击 OK 按钮。

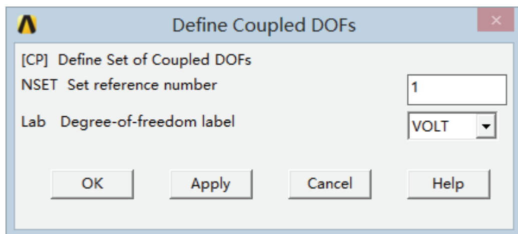


图 21-22　Define Coupled DOFs 对话框

（4）施加电流值。在输入框中输入：

*get,n1,node,,num,min

将最小节点号赋予变量 n1。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Magnetic→Other→AppCurrSeg→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“n1”，单击 OK 按钮，弹出 Apply AMPS on nodes 对话框，电流值的实部（VALUE）为 curr，虚部（VALUE2）值为 curi，如图 21-23 所示，单击 OK 按钮。

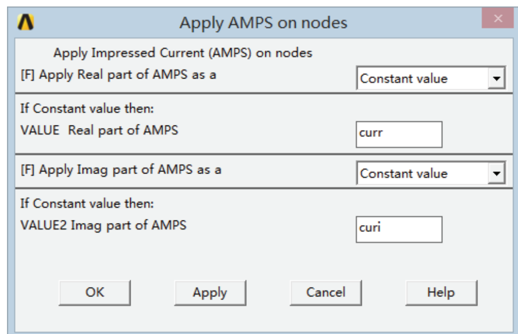


图 21-23　Apply AMPS on nodes 对话框

9．计算求解

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，出现 Solve Current Load Step 对话框，单击 OK 按钮开始求解。当出现 Note 提示框时，表示求解结束。执行 Utility Menu→File→Save AS 菜单命令，将文件另存到适当的位置。

10．结果后处理

完成求解后，进入/POST1 通用后处理器。

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，在 INF0 中选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）读取计算结果。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Read Result→Last Result 菜单命令。

（3）查看电场分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Electric Field→Electric field vector sum，如图 21-24 所示，单击 OK 按钮，显示电场分布云图如图 21-25 所示。

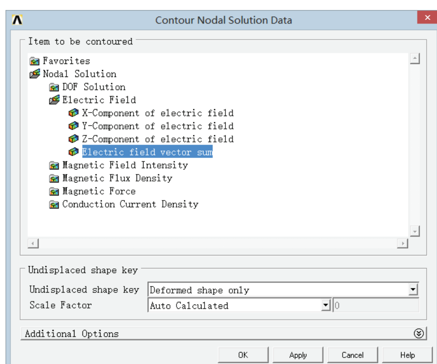


图 21-24　查看电场分布

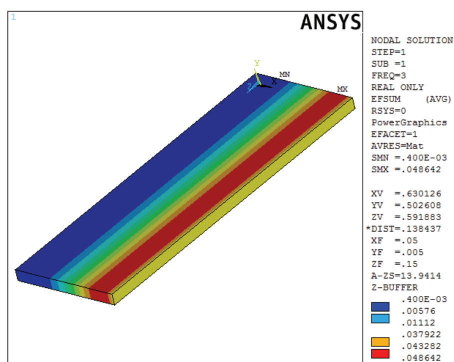


图 21-25　电场分布云图

（4）查看磁场强度分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Magnetic Field Intensity→Magnetic field intensity vector sum，如图 21-26 所示，单击 OK 按钮，显示磁场强度分布云图如图 21-27 所示。

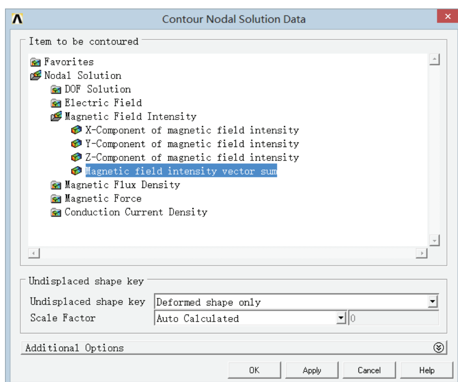


图 21-26　查看磁场强度分布云图

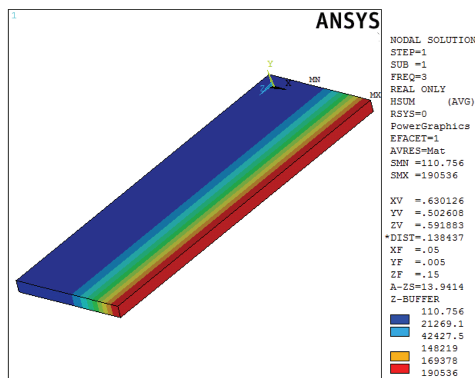


图 21-27 磁场强度分布云图

（5）查看磁场力分布云图。执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Magnetic Force→Magnetic force vector sum，如图 21-28 所示，单击 OK 按钮，显示磁场力分布云图如图 21-29 所示。

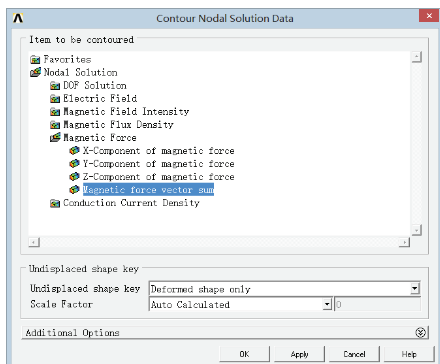


图 21-28　查看磁场力分布云图

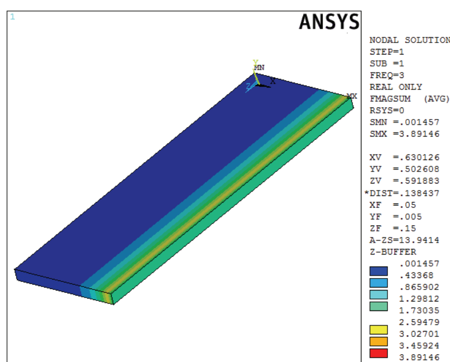


图 21-29　磁场力分布云图

11．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

21.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise21-1
/PREP7
ET,1,SOLID236
KEYO,1,2,2                ! timie-integrated VOLT, symmetric system
KEYO,1,8,1
l=0.3
d=0.1
w=0.01
mur=1
rho=1.0e-8
fr=3
curr=2000.0
curi=1000.0
n=20
pi=3.1415926
mu0=pi*4.0e-7
mp,rsvx,1,rho             ! 定义电阻材料属性
mp,murx,1,mur
BLOCK,0,d,0,w,0,l,
LSEL,S,LOC,X,d/2
LESIZE,ALL, , ,n, ,1, , ,1,
LSEL,INVE
LESIZE,ALL, , ,1, ,1, , ,1,
ALLSEL,ALL
```

```
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1
VMESH,1
/SOL
ANTYPE,3
HARFRQ,0,fr,
NSUBST, ,
KBC,0
!*
NSEL,S,LOC,X,d
NSEL,A,LOC,Z,0
NSEL,A,LOC,Z,l
D,ALL,AZ,0
NSEL,S,LOC,Z,0
D,ALL,VOLT,0
NSEL,S,LOC,Z,l
CP,1,VOLT,ALL
*get,n1,node,,num,min
F,n1,AMPS,curr,curi
NSEL,ALL
/SOLU
SOLVE
FINI
/POST1
SET,LAST
/EFACET,1
PLNSOL, EF,SUM, 0
/EFACET,1
PLNSOL, H,SUM, 0
/EFACET,1
PLNSOL, FMAG,SUM, 0
FINISH
SAVE
/QUIT
```

21.3　本章小结

本章主要对磁场的概念、分类以及计算方法进行了全面介绍，使读者对磁场分析有一个概括的了解，并通过一个实例的详细讲解，帮助读者掌握使用 ANSYS 进行磁场分析的方法和步骤。



高 级 篇

第 22 章 耦合场分析

很多时候，ANSYS 分析并不仅仅只有一个自由度，还涉及其他自由度，需要多个物理场耦合分析。本章主要介绍 ANSYS 耦合场分析的基本原理及分析方法，并着重对直接耦合和间接耦合分析方法（手动方法和物理环境法）的基本原理及详细步骤作详细介绍。通过一些操作实例，具体讲述应用 ANSYS 进行耦合分析的基本思路及基本步骤和技巧。

学习目标：

（1）了解 ANSYS 耦合分析的定义、分类以及直接耦合、间接耦合的应用范围；

（2）掌握应用 ANSYS 进行热-结构耦合分析的基本操作步骤和命令；

（3）掌握应用 ANSYS 进行电-热-应力耦合分析的基本操作步骤和命令；

（4）掌握应用 ANSYS 进行电-磁-热场耦合分析的基本操作步骤和命令。

22.1 耦合场分析概述

22.1.1 耦合场分析的定义

耦合场分析是指在分析过程中考虑了两种或多种工程物理场之间相互作用的分析。例如压电分析，考虑结构和电场间的相互作用，主要用于求解由施加位移造成的电压分布问题，反之亦然。其他的耦合场分析还有热-应力耦合分析、热-电耦合分析、流体-结构耦合分析等。

需要进行耦合场分析的工程应用有压力容器（热-应力分析）、流体流动的压缩（流体-结构分析）、感应加热（磁-热分析）、超声波换能器（压电分析）以及磁体成形（磁-结构分析），以及微电机械系统（MEMS）等。

22.1.2 耦合场分析的类型

耦合场分析的过程取决于所需解决的问题是由哪些场的耦合作用，但是，耦合场分析最终要归结为间接耦合方法和直接耦合方法。

1．间接耦合解法

间接耦合解法是按照顺序进行两次或更多次的相关场分析，它是通过把第一次场分析的结果作为第二次场分析的载荷来实现两种场的耦合的。例如，间接热-应力耦合分析是将热

分析得到的节点温度作为“体力”载荷施加在后续的应力分析中来实现耦合的。

许多问题需要热到结构的耦合（温度引起的热膨胀），但结构到热的耦合是可以忽略的，小的应变将不对初始的热分析结构产生影响。在实用问题中，间接耦合比直接耦合要方便一些，因为单场分析使用单场单元，计算迭代次数低。

在 ANSYS 中有两种基本方法进行间接耦合场分析，它们的主要区别在于每个场的特性是如何表示的。

（1）物理环境方法：单独的数据库文件在所有场中使用。用多个物理环境文件来表示每个场的特性。

（2）手工方法：多个数据库被建立和存储，每次研究一种场。每个场的数据都存储在数据库中。

下面主要对物理环境法作详细介绍。

为了自动进行间接顺序耦合场分析，ANSYS 允许在一个模型中定义多个物理环境，一个物理环境代表模型在一个场中的行为特性。物理环境文件是 ASCII 码文件，主要包括以下内容：

（1）单元类型和选项；

（2）节点和单元坐标系；

（3）耦合和约束方程；

（4）分析和载荷步选项；

（5）载荷和边界条件；

（6）GUI 界面和标题。

在建立带有物理环境的模型时，要选择相容于所有物理场的单元类型。例如，8 节点的热分析六面体单元与 8 节点的结构六面体单元相容，而不与 10 节点结构四面体二阶单元相容，如图 22-1 所示。

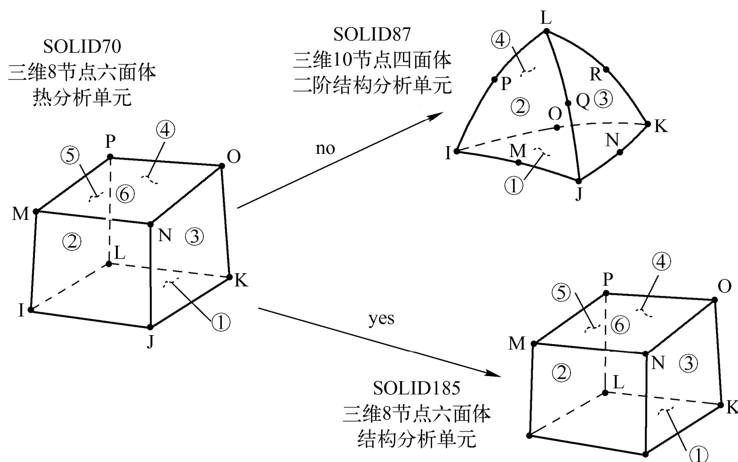
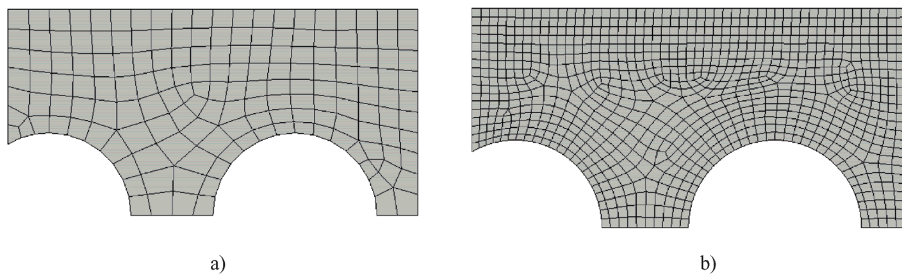


图 22-1　间接耦合分析中热和结构两场单元相容性关系示意图

除了相似的单元阶次（形函数阶次）和形状，绝大多数单元需要相似的单元选项（如平面 2D 单元的轴对称）以满足相容性。但是，许多载荷类型不需要环境之间完全相容。例如，8 节点热体单元可以用来给 20 节点结构块单元提供温度。许多单元需要特殊单元选项设置来与不同阶次的单元相容。

单元属性号码（MAT, REAL, TYPE）在环境之间号码必须连续，对于在某种特殊环境中不参与分析的区域使用空单元类型（type # 0）来划分网格。例如，在磁场分析中需要对物体周围的空气建模，而之前的电场分析不需要周围的空气部分。

网格划分的密度直接影响着计算的精度，因此，要确认所建立的模型网格划分密度在所有的物理环境中都能得到可以接收的结果。图 22-2a 所示的网格在温度分析中可以得到满意的结果，而图 22-2b 所示的网格划分密度在结构分析中才可以得到比较准确的分析结果。



a) b)

图 22-2 热和结构两场有限元模型对比图

a）温度场有限元模型 b）结构场有限元模型

以热—结构场耦合为例，应用物理环境法主要分析步骤如下：

（1）进行热分析前的处理操作。

（2）写热分析物理文件。

（3）清理边界条件和存储数据。

（4）进行结构分析前处理操作。

（5）写结构分析物理文件。

（6）读取热分析物理文件。

（7）对热分析进行求解和后处理。

（8）读取结构分析物理文件。

（9）从热分析场中读取温度分析结果。

（10）对结构场进行求解和后处理。

2．直接耦合解法

直接耦合解法利用包含所有必须自由度的耦合单元类型，仅仅通过一次求解就能得出耦合场分析结果，适用于多个物理场各自的响应相互依赖的情况。

由于平衡状态要满足多个准则才能取得，直接耦合分析往往是非线性的。每个节点上的自由度越多，矩阵方程就越庞大，耗费的机时也越多。在这种情况下，耦合是通过计算包含所有必需项的单元矩阵或单元载荷向量来实现的。例如，利用单元 SOLID5、PLANE13 或 SOLID98 可直接进行压电分析。在 ANSYS 中具有耦合场分析能力的单元如表 22-1 所示。

表 22-1 ANSYS 16.0 中具有耦合场分析能力的单元

PLANE223	SOLID227	TRANS126	TARGE169
PLANE13	SOLID5	FLUID29	TARGE170
PLANE233	SOLID98	FLUID30	CONTA171
PLANE53	SOLID62	FLUID116	CONTA172

（续）

SHELL157	SOLID236	FLUID136	CONTA173
LINK68	SOLID237	FLUID220	CONTA174
SOLID226	SOLID97	FLUID221	CONTA175

在直接耦合场分析中要注意以下几个方面：

（1）使用耦合场单元的自由度序列应该符合需要的耦合场要求，模型中不需要耦合的部分应使用普通单元。

（2）注意每种单元类型的单元选项、材料特性和实常数。耦合场单元相对来说有更多的限制，例如，PLANE13 不允许热质量交换而 PLANE55 单元可以，SOLID5 单元不允许塑性和蠕变而 SOLID45 可以。

（3）不同场之间使用统一的单位制。

（4）由于需要迭代计算，热耦合场单元不能使用子结构。

在直接耦合场分析的加载、求解、后处理中要注意以下方面。

（1）如果对带有温度自由度的耦合场单元选择瞬态分析类型的话，需要注意：

1）瞬态温度效果可以在所有耦合场单元中使用。

2）瞬态电效果（电容、电感）不能包括在热—电分析中，除非只有 TEMP 和 VOLT 自由度被激活。

3）带有磁向量势自由度的耦合场单元可以用来对瞬态磁场问题建模，如 SOLID62；带有标量势自由度的单元只能模拟静态现象，例如 SOLID5。

（2）学习每种单元的自由度和允许的载荷。耦合场单元允许在相同位置，包括节点、单元面等，施加多种类型的载荷，如 D、F、SF、BF 等。

（3）耦合场分析可以是高度非线性的，这时考虑使用 Predictor 和 Line Search 功能改善收敛性。

（4）考虑使用 Multi-Plots 功能将不同场的结果同时输出到多个窗口中。

22.1.3 直接和间接耦合法的应用范围

1．间接耦合分析

对于耦合情况的相互作用非线性程度不是很高的情况，两个分析之间相对独立，间接耦合法更加灵活和有效。例如，在热应力顺序耦合分析中，可以先进行非线性瞬态热分析，然后再进行线性静态应力分析。可以将瞬态热分析中任一载荷步或时间点的节点温度作为载荷施加到应力分析中。

间接耦合还可以在不同物理场之间交替执行，直到收敛到一定精度为止。间接耦合分析应用实例如下：

（1）热—结构耦合。透平机叶片部分分析属于热—结构间接耦合分析，如图 22-3 所示，叶片和盘中的温度会产生热膨胀应变，这会显著影响应力状态。由于应变较小，而且接触区域是平面对平面的，因此温度解不用更新。

（2）热—电耦合。嵌于玻璃盘的电热器分析属于热—电间接耦合分析，如图 22-4 所

示。嵌于玻璃盘的电热器中有电流，这使得电线中有焦耳热产生，由于热效应，电线和盘中温度升高，由于系统温度变化不大，热引起的电阻变化被忽略，因此认为电流是不变的。

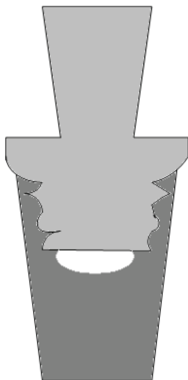


图 22-3 透平机叶片部件

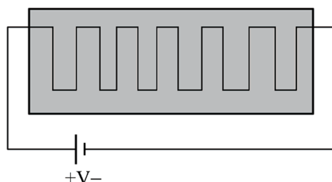


图 22-4 嵌于玻璃盘的电热器

2．直接耦合分析

当耦合场之间的相互作用是高度非线性时，直接耦合具有优势，它使用耦合变量一次求解得到结果。

直接耦合的例子有压电分析、流体流动的共轭传热分析、电路−电磁分析。这些分析中使用了特殊的耦合单元直接求解耦合场间的相互作用。

涉及热分析的直接耦合分析应用实例包括：

（1）热−结构耦合。透钢板、铝板等的热轧过程，热模锻等都是热−结构直接耦合的典型工程实例。热轧铝过程示意图如图 22-5 所示，在此过程中，钢板、铝板、模锻工件的温度将影响材料弹塑性特性和热应变，而机械和热载荷使得钢板、铝板、模锻工件产生大应变，因此，在新的热分析必须计入形状改变。可见，热、结构两场相互影响，不断迭代，属于热−结构的直接耦合分析。

（2）热−电磁场耦合。钢芯的热传递是热−电磁场直接耦合的典型应用，如图 22-6 所示。传导线圈在钢芯周围产生电磁场，该区域的交变电流在钢芯内产生焦耳热，而钢芯在热作用下产生高温，由于温度变化梯度很大，因此必须考虑钢芯材料特性随温度的变化，而且，磁场变化的强度和方向都会改变。可见，热、电、磁场相互影响，属于热−电磁场的直接耦合过程。

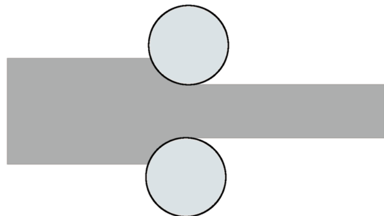


图 22-5 热轧铝过程示意图

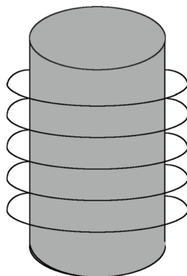


图 22-6 电磁加热钢芯过程示意图

进行热−应力间接耦合解法和直接耦合解法的求解关系流程图如图 22-7 所示。



图 22-7 热-应力间接耦合解法和直接耦合解法的求解关系流程图

a）间接耦合求解 b）直接耦合求解

22.2 间接耦合分析

在实际工程应用中，热-应力耦合分析是一种最常见的耦合分析问题。主要是结构受热或变冷时，由于热胀冷缩产生变形，若变形一旦受到某些限制，则在结构中产生热应力。另外，当材料不同时，热膨胀系数不同，因而产生不同的变形，也会形成热应力。

在大部分的工程应用中，热分析得到的温度对结构分析的应变和应力有显著的影响，而结构的响应对热分析结果影响很小。这种情况，均可以采用间接耦合分析方法对其进行分析。本节对间接耦合热-应力分析方法进行详细讨论。

22.2.1 间接耦合分析的特点

间接耦合分析可以使用手动方法或物理环境方法（PEM）。与物理环境法相比，手动方法（MM）具有以下优点和缺点。

1．优点

（1）在建立热和结构模型时限制较少，例如，属性号码和网格划分在热和结构中可以不同。而物理环境方法需要所有的模型都必须是一致的。

（2）简单而适用性强，发展相对比较成熟。

2．缺点

（1）必须建立热和结构数据库和结果文件。与物理环境相比，需要占用较多的存储空间。

（2）当要考虑其他物理场时，手动方法会比较麻烦。

如果要在模型中加入或删除材料，模型中相应的单元就会“存在”或“消亡”。单元生死选项就用于在这种情况下杀死或重新激活选择的单元。

22.2.2 间接耦合分析的基本过程

在进行间接热-应力耦合分析中，由温度求解得到的节点温度将在结构分析中作体载荷。当采用手工方法进行顺序求解时，将温度结果施加到结构单元上有两种方法。这两种方法的不同作用在于结构模型和热模型是否具有相同的网格划分。

1．热和结构分析具有相同的网格划分

（1）热模型自动转换为结构模型，温度场单元和结构单元的对应关系列于表 22-2。

表 22-2 ANSYS 中温度场和应力场单元对应关系

温度场	应力场	温度场	应力场	温度场	应力场	温度场	应力场
MASS71	MASS21	PLANE55	PLANE182	SHELL157	SHELL63	SOLID87	SOLID187
LINK33	LINK180	PLANE77	PLANE183	SURF151	SURF153	SOLID90	SOLID186
LINK68	LINK8	SHELL131	SHELL181	SURF152	SURF154	SOLID278	SOLID185
PLANE35	PLANE2	SHELL132	SHELL281	SOLID70	SOLID185	SOLID279	SOLID186

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Switch Elem Type 菜单命令，弹出图 22-8 所示的 Switch Elem Types 对话框，选中 Thermal to Struc 项，即可进行温度场向应力场分析的转变。

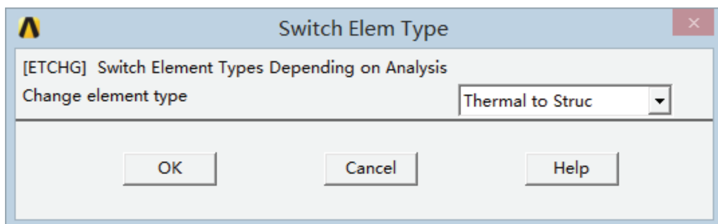


图 22-8 Switch Elem Type 对话框

注意：转换单元类型时，把所有的单元选项重新设置回它们原来的默认设置。例如，若用户在热分析中使用的是 2-D 轴对称单元，则需要在转换后重新指定轴对称选项。因此，一定要确保设置正确的单元选项。

设置方式为执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中选中 Options，修改其单元选项。

（2）施加结构载荷并包括温度作为加载的一部分。

执行 Main Menu→Solution→Load→Apply→Structure→Temperature→From ThermAnaly 菜单命令，弹出 Apply TEMP from Thermal Analysis 对话框，如图 22-9 所示，在对话框中输入期望的载荷步和子步号，并选择以 rth 命名的热分析的结果文件。

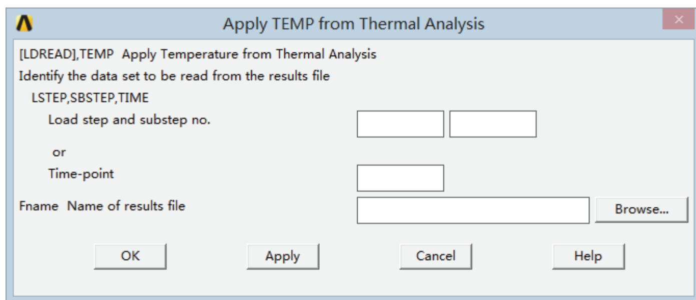


图 22-9 Apply TEMP from Thermal Analysis 对话框

这种热和结构分析具有相同网格划分的间接耦合分析过程，其温度载荷读取流程图如图 22-10 所示。

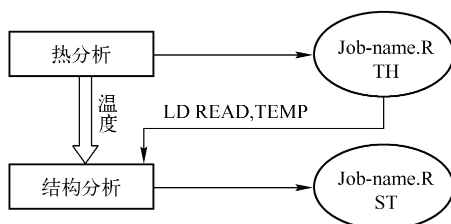


图 22-10 热-应力耦合分析温度载荷读取流程图

2．热和结构分析具有不同的网格划分

采用不同于热模型网格划分的结构单元，是为了得到更好的结构结果。这种情况下，结构体载荷是从热分析中映射过来的，对热分析结果进行插值，然后施加到结构场中，是一个比较复杂的过程。在物理环境法中不能采用该方法。

热和结构分析可分为两种情况——具有相同的网格划分和不同的网格划分，其具体流程如图 22-11 所示。

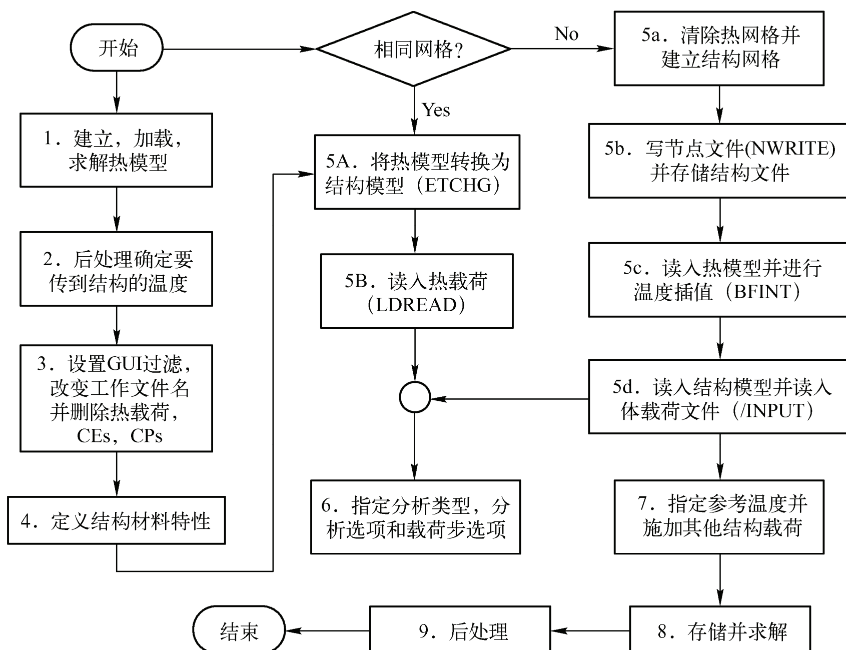


图 22-11 间接手工热-应力耦合分析流程图

22.2.3 间接耦合分析的基本操作步骤

手动进行间接热-结构耦合场基本分析步骤如下：

（1）建立热模型并进行瞬态或稳态热分析，得到节点温度值。

（2）查看计算结果，并找出温度梯度较大的时间点或载荷步。

（3）改变工作文件名。

（4）删除所有热载荷、耦合序列和约束方程。

（5）当热网格不在结构模型中使用时，还需要进行如下操作。

1）清除热网格，删除热单元类型并定义结构单元类型，改变网格尺寸并划分结构模型。

2）选择温度体载荷的所有节点并写入节点文件。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Nodes→Write Node File 命令菜单，弹出图 22-12 所示的 Write Nodes to File 对话框，在 Name of file 文本框中输入要写入的节点文件名，单击 OK 按钮，生成扩展名为 NODE 的节点文件。

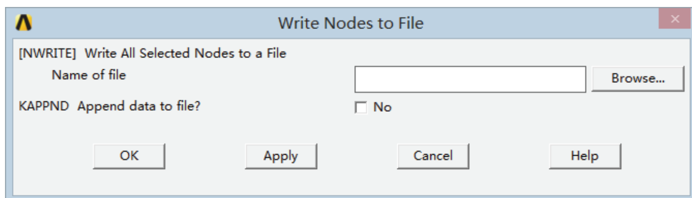


图 22-12　Write Nodes to File 对话框

3）读入需要的结果序列，并进行体载荷插值。

执行 Main Menu→General Postproc→Submodeling→Interp Body Forc 菜单命令，弹出图 22-13 所示的 Interpolate Body Force Data to Submodel Nodes 对话框，将 Fname1 项设为第 2）步中所设置的节点文件， Fname2 项设为要写入的体温度载荷。这步操作在有温度计算结果的前提下才能执行。

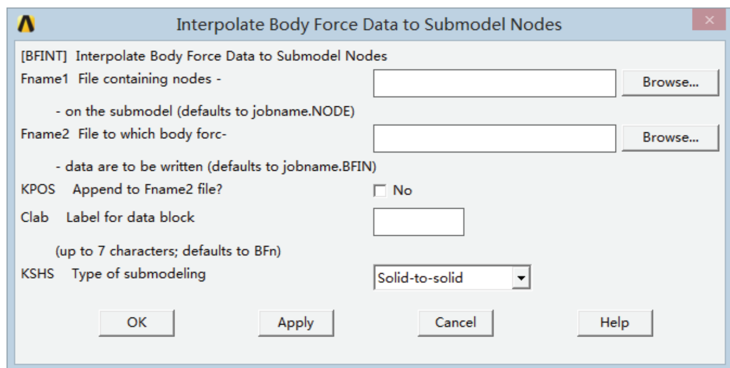


图 22-13　Interpolate Body Force Data to Submodel Nodes 对话框

4）读入载荷文件施加温度载荷。

执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，弹出文件读取对话框，在对话框中选中第 3）步中所写的所要施加的体温度载荷文件。

注意：有些情况下，热网格和结构网格并不完全一致。这时，ANSYS 对超过热模型的结构模型节点进行体载荷插值。例如，结构网格包括在热模型中不存在圆角时，许多节点将落在热模型外面。如果圆角足够大而且热模型足够细，圆角区域的载荷将不能写出，如图 22-14 所示。

默认的判断准则是插值的结构节点到热单元边界的距离是否小于单元边长的 0.5 倍。也可以设置这个判断准则的数值，该项操作不支持 GUI 操作，只能通过命令 BFINT 实现。

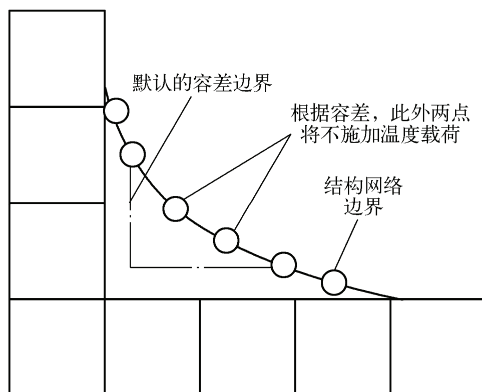


图 22-14　温度载荷插值示意图

22.2.4 使用物理环境运行间接耦合场分析

本节将详细描述使用物理环境进行间接耦合场分析的主要操作步骤。

使用物理环境进行间接耦合场分析，比较重要的一步就是创建物理环境，需要对每一个物理过程执行这一步，作为耦合场分析的一部分。

（1）对每一个物理分析过程，定义所需的单元类型。如果某个区域在某一个物理分析中不涉及，则设为 0 单元，零单元在分析中将被忽略。

（2）定义材料属性、实常数、单元坐标系，与前面定义的属性号对应。

（3）将单元类型、材料、实常数及单元坐标系的编号赋予实体模型的面或体，分别使用 AATT 命令（执行 Main Menu→Preprocessor→Attributes→All Areas or Picked Areas 菜单命令）和 VATT 命令（执行 Main Menu→Preprocessor→Attributes→All Volumes or Picked Volumes 菜单命令）来实现。

（4）施加基本物理载荷及边界条件。这些条件在整个迭代过程中的每一个物理环境的执行中都相同（对于稳态问题）。

（5）设置所有的求解选项。

（6）写入物理环境文件。执行 Main Menu→Preprecessor→Physics Environ→write 菜单命令，给物理环境选择一个标题，写入物理环境文件。

（7）清空数据库中当前的物理环境，准备创建下一个物理环境。执行 Main Menu→Preprocessor→Physics Environ→clear 菜单命令，清空数据库中当前的物理环境。

（8）重复以上步骤，准备下一个物理环境。

（9）执行 SAVE 命令保存数据及物理环境文件指针。

（10）进行求解计算。对于每一个物理环境的求解，均需要先读保存的物理环境文件。假设此多物理场耦合分析的工作文件名为“Induct”，并写了两个物理环境文件，这两个文件名分别为 Induct.PH1 和 Induct.PH2，则可以按照以下操作来完成间接求解过程。

```
/solu!进行求解
physics, read, Induct.PH1   !读入温度场分析
Solve
Finish
/solve
```

```
physics, read, Induct.PH2
LDREAD, TEMP,,,,,,RTH        !读入温度载荷
Solve
```

提示：LDREAD 中的扩展名确定读入的结果文件类型，从 Jobname.rth 文件中读入热分析结果。

22.3 直接耦合分析

在耦合场是高度非线性的情况下，结构变形的温度相应比较大，采用直接热-应力耦合分析更好。直接热-应力耦合分析，采用具备热和结构自由度的单元进行分析即可。除了考虑随温度的不同对应力场分布的影响外，因结构的变形而对温度分布的影响也被考虑在内，是真正的多物理场耦合分析。

虽然直接热-应力耦合分析具备这些优点，但同时，该方法耗费时间比较长，计算代价高，在结构变形对温度分布影响不大的情况下，最好采用间接热-应力耦合分析方法。

直接热-应力耦合分析的主要操作步骤如下。

（1）采用支持热-应力耦合的单元建立模型并划分网格。支持热-应力耦合的单元及自由度列于表 22-3。

表 22-3　热-应力耦合单元及自由度

单　元	自　由　度
PLANE223	UX, UY, TEMP, VOLT, CONC
SOLID226	UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, CONC
SOLID227	UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, CONC
SOLID5	UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG
PLANE13	UX, UY, TEMP, VOLT, AZ
SOLID98	UX, UY, UZ, TEMP, VOLT, MAG

（2）在模型上施加结构载荷、热载荷和约束条件。

（3）求解并查看热分析结果和结构分析结果。

采用直接热-应力耦合分析的操作流程如图 22-15 所示。

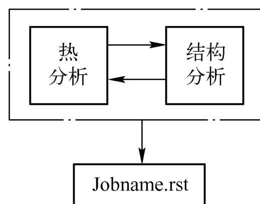


图 22-15　直接热-应力耦合分析的操作流程

22.4 实例 1——多层热套压力容器的热应力耦合分析

22.4.1 问题描述

多层热套压力容器是在内筒外面套合上一至数层外筒，组成筒节。多层热套压力容器几何模型如图 22-16 所示，该容器内层半径为 400～406 mm，中间断面 406～426 mm，外层断面 426～430 mm，高 30 mm，两结合面处的倾斜角度为 0.5°。其截面几何尺寸如图 22-17 所示，各层材料参数列于表 22-4。

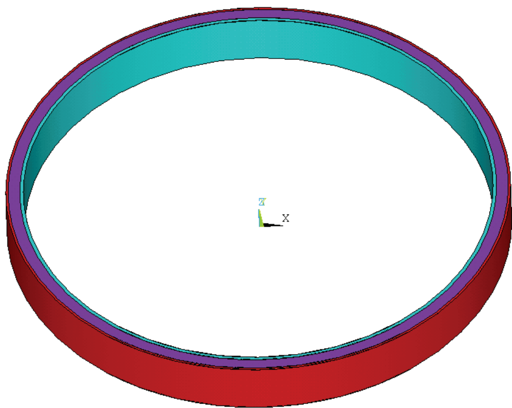


图 22-16　多层热套压力容器几何模型

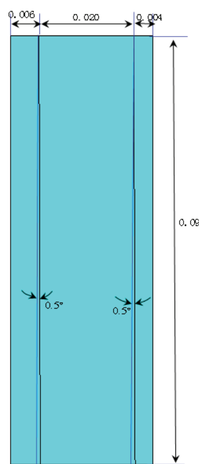


图 22-17　多层热套压力容器单侧截面图

表 22-4　材料参数表

材 料 类 型	热膨胀系数 1/℃	弹性模量/Pa	泊松比	热传导系数 W/(m•K)
内层材料	1.60E-5	198E9	0.3	1.63
中间材料	1.28E-5	201E9	0.3	6.52
外层材料	2.35E-5	63E9	0.3	22.6

内壁承受 0.5 MPa 的压力，内壁温度 200℃，外界环境温度 20℃，与外界对流换热系数为 25 W/(m^2•K)，各筒间的传导热阻为 500 W/(m^2•K)。

22.4.2 问题分析

本算例采用物理环境法进行间接热结构耦合场分析，应用接触向导建立各筒之间的接触对。

该问题属于轴对称问题，在热分析时选用二维 8 节点 PLANE77 单元，在结构分析时选用二维 8 节点 PLANE82 单元。接触对的建立选用目标单元 TARGE169 和接触单元 CONTA172。

计算采用国际单位制，初始参考温度为 0℃。

22.4.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise22-1”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，在弹出的 Library of Element Types 对话框中选择 Plane77 单元，即先选中 Thermal Solid，再在右侧选择 8node 77 单元，然后单击 OK 按钮。

在 Element Types 对话框中，选中 Type 1 PLANE77，单击 Options 按钮，弹出 PLANE77 element type options 对话框， K3 项选中 Axisymmetric，如图 22-18 所示，单击 OK 按钮。

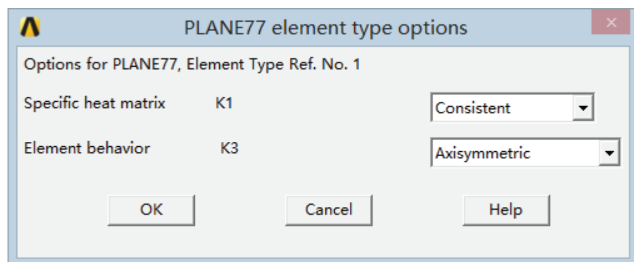


图 22-18 PLANE77 element type options 对话框

3．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。

（1）定义内层材料导热系数。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令， KXX 项设为 1.63，单击 OK 按钮。

（2）定义中间层材料导热系数。在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认设置 2，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 2 的定义。

选中 Material Model Number 2，在右侧执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，定义 2 号材料的导热系数， KXX 项设为 6.52，单击 OK 按钮。

（3）定义外层材料导热系数。在 Define Material Model Behavior 对话框中，继续执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认设置 3，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 3 的定义。

选中 Material Model Number 3，在右侧执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，定义 3 号材料的导热系数， KXX 项设为 22.6，单击 OK 按钮。

4．定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

```
pi=3.1415926
gma=0.5*pi/180
```

5．建立几何模型

（1）建立关键点。

1）建立内层材料的构造关键点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 菜单命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，在 NPT 项留空， X、Y、Z 项分别设为 0.4、0.09、0，单击 Apply 按钮，建立 1 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.4、0、0，单击 Apply 按钮，建立 2 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.406+0.03*TAN(gma)、0、0，单击 Apply 按钮，建立 3 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.406、0.09、0，单击 Apply 按钮，建立 4 号关键点。

2）建立中间材料的构造关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.406-u2、0.09、0，单击 Apply 按钮，建立 5 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.406-u2+0.03*TAN(gma)、0、0，单击 Apply 按钮，建立 6 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.426+0.03*TAN(gma)、0、0，单击 Apply 按钮，建立 7 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.426、0.09、0，单击 Apply 按钮，建立 8 号关键点。

3）建立外层材料的构造关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.426-u2、0.09、0，单击 Apply 按钮，建立 9 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.426-u3+0.03*TAN(gma)、0、0，单击 Apply 按钮，建立 10 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.430、0、0，单击 Apply 按钮，建立 11 号关键点。

继续将 X、Y、Z 项设为 0.430、0.09、0，单击 Apply 按钮，建立 12 号关键点。各关键点位置如图 22-19 所示，由于有些关键点距离比较近，如 4 和 5、3 和 6、7 和 10、8 和 9，因此以同一个关键点表示。





图 22-19　关键点位置图

（2）建立面。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，选中 List of Items，依次输入 1、2、3、4，按〈Enter〉键确认，单击 Apply 按钮，建立内层材料面。

继续在关键点拾取对话框，选中 List of Items，输入 5、6、7、8，按〈Enter〉键确认，单击 Apply 按钮，建立中间材料面。

继续在关键点拾取对话框，选中 List of Items，输入 9、10、11、12，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，建立外层材料面。

（3）赋予模型材料和单元属性。

1）定义内层材料面。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面选取对话框，选中 List of Items，输入 1，单击 Apply 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 1，TYPE 项选中 1 PLANE77，单击 Apply 按钮，完成内层材料面的定义。

2）定义中间材料面。继续在面选取对话框中，选中 List of Items，输入 2，单击 Apply 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 2，TYPE 项选中 1 PLANE77，单击 Apply 按钮，完成中间材料面的定义。

3）定义外层材料面。继续在面选取对话框中，选中 List of Items，输入 3，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 3，TYPE 项选中 1 PLANE77，单击 OK 按钮，完成外层材料面的定义。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（4）显示面。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，Elem/Attrib numbering 项选中 Material numbers，/NUM 项选中 Colors only，如图 22-20 所示，单击 OK 按钮。显示面如图 22-21 所示。

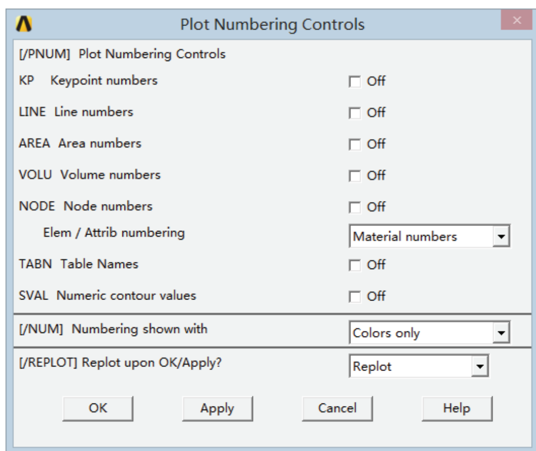


图 22-20 Plot Numbering Controls 对话框

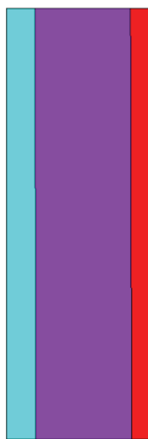


图 22-21 建立面几何模型图

（5）显示线。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框， LINE 项取消选中 off， /NUM 项选中 Numbers only，单击 OK 按钮。执

行 Utility Menu→Plot→Areas 菜单命令，显示线如图 22-22 所示。

6．划分单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，在弹出的 Global Element Sizes 对话框中，SIZE 项设为 0.001，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Target Surf 菜单命令，选择 Pick All，生成有限元模型，如图 22-23 所示。

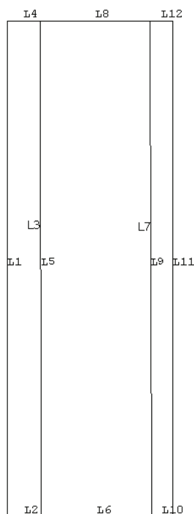


图 22-22 建立线编号图

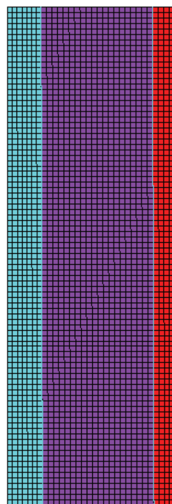


图 22-23 有限元模型图

7．建立接触单元

（1）建立内层材料和中间层材料之间的接触。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Contact Pair 菜单命令，弹出 Pair Based Contact Manager 对话框，如图 22-24 所示。

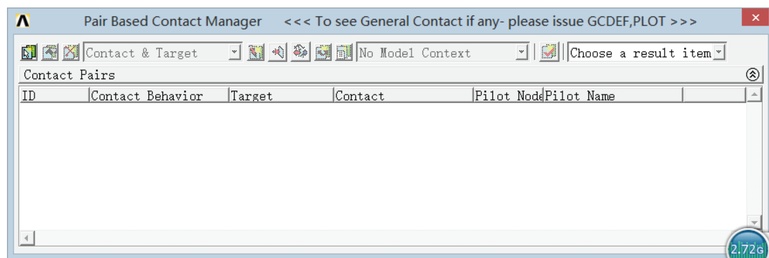


图 22-24 Pair Based Contact Manager 对话框

单击按钮，弹出 Contact Wizard 对话框，如图 22-25 所示，单击 Pick Target 按钮，弹出线拾取对话框，选中 List of Items，输入“3”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。在图 22-25 所示的对话框中，Next 按钮可用，单击 Next 按钮，弹出 Contact Wizard 对话框，如图 22-26 所示。

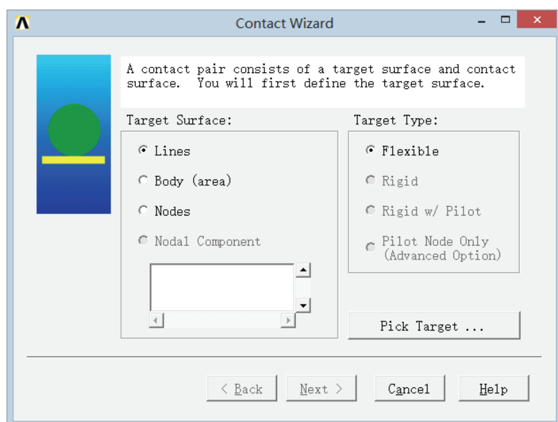


图 22-25 目标面拾取

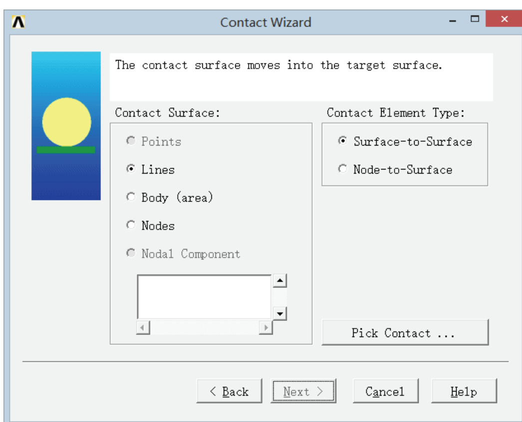


图 22-26 接触面拾取

在接触面拾取对话框中，单击 Pick Contact 按钮，弹出线拾取对话框，选中 List of Items，输入“5”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。在图 22-26 所示的 Contact Wizard 对话框中，Next 按钮可选，单击 Next 按钮，弹出 Contact Wizard 对话框，如图 22-27 所示。

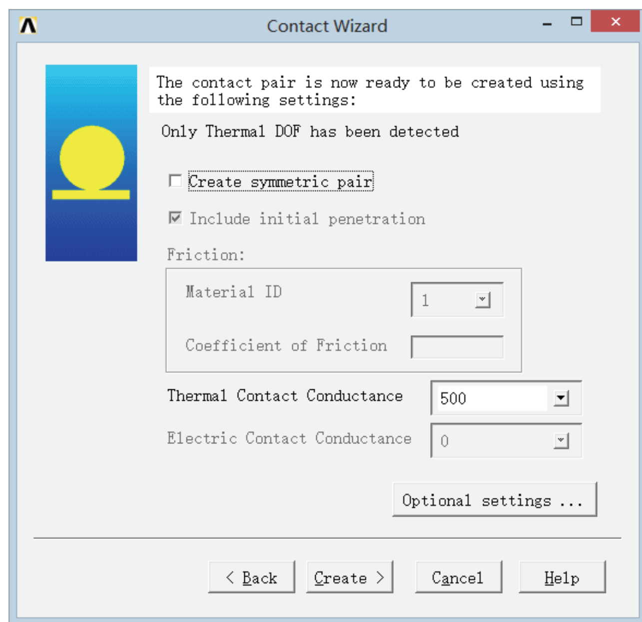


图 22-27 热阻设置

在图 22-27 所示的热阻设置对话框中，Thermal Contact Conductance 项设为 500，单击 Create 按钮，建立内层材料和中间层材料之间的接触，建立的接触如图 22-28 所示，单击 Finish 按钮，关闭 Contact Wizard 对话框。

（2）建立中间材料和外层材料之间的接触。

继续在 Contact Manager 对话框中，单击按钮，弹出 Contact Wizard 对话框，单击 Pick Target 按钮，弹出线拾取对话框，选中 List of Items，输入“7”，按〈Enter〉键确

认，单击 OK 按钮。在目标面拾取对话框中，Next 按钮可用，单击 Next 按钮，弹出接触面拾取对话框。

在接触面拾取对话框中，单击 Pick Contact 按钮，弹出线拾取对话框，选中 List of Items，输入“9”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。在接触面拾取对话框中，Next 按钮可用，单击 Next 按钮，弹出热阻设置对话框。

在热阻设置对话框中， Thermal Contact Conductance 项设为 500，单击 Create 按钮，建立中间层材料和外层材料之间的接触，建立的接触如图 22-29 所示，单击 Finish 按钮，关闭 Contact Wizard 对话框。



图 22-28 内层材料和中间层材料之间的接触



图 22-29 外层材料和中间层材料之间的接触

在 Pair Based Contact Manager 对话框中，单击右上角的×按钮，关闭对话框。

8．施加温度场边界条件

（1）施加内壁温度边界。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，选中 List of Items，输入“1”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。弹出 Apply TEMP on Lines 对话框，选中 TEMP， VALUE 项设为 200，单击 OK 按钮。

（2）施加对流换热载荷。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，选中 List of Items，输入“11”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。弹出 Apply CONV on Lines 对话框，VALI Film coefficient 项设为 25，VAL2I 项设为 20，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

9．设置为稳态求解

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Steady-State，单击 OK 按钮。

10．设置温度偏移

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Static or Steady Analysis 对话框， TOFFST 项设为 273，其他项保留默认设置。单击 OK 按钮。

11．写温度场物理分析文件

执行 Main Menu→Preprocessor→Physics→Environment→Write 菜单命令，弹出 Physics Write 对话框，Title 项设为 Thermal，如图 22-30 所示，单击 OK 按钮。

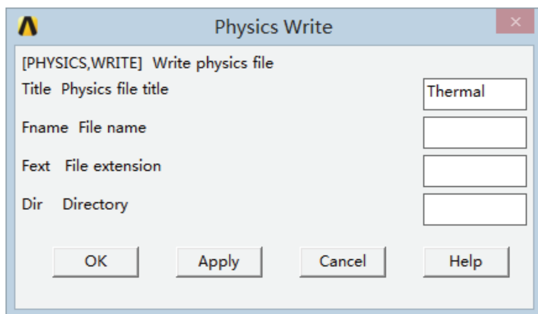


图 22-30 Physics Write 对话框

接下来进行结构场分析的前处理并写结构场物理分析文件。

1．清空物理环境数据

执行 Main Menu→Preprocessor→Physics→Environment→Clear 菜单命令，弹出图 22-31 所示的 Physics Clear 对话框，单击 OK 按钮。

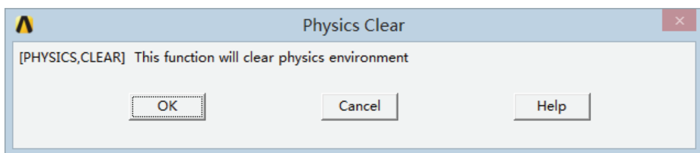


图 22-31 Physics Clear 对话框

2．删除温度场边界条件及对流换热载荷

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Delete→All Load Data→All Loads & Opts 菜单命令，弹出 Delete All Loads and LS Options 对话框，单击 OK 按钮，确认删除所有载荷。

3．转换单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Switch Elem Type 菜单命令，弹出 Switch Elem Type 对话框，如图 22-32 所示，选中 Thermal to Struc，单击 OK 按钮。弹出警告信息，单击 Close 按钮。

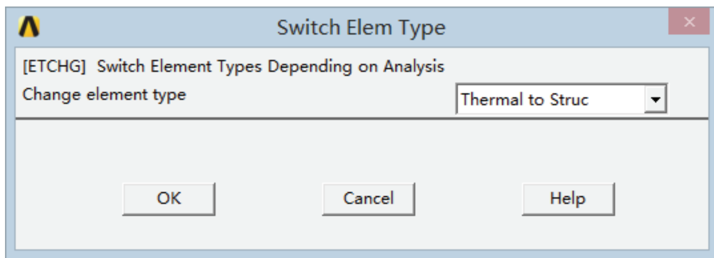


图 22-32 Switch Elem Type 对话框

4．更改单元分析选项

（1）更改 PLANE183 单元分析选项。

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的

Element Types 对话框中可以看到，原来的 PLANE77 单元已经转换为 PLANE183 单元。

选中 Type 1 PLANE183，单击 Options 按钮，弹出 PLANE183 element type options 对话框，K1 项选中 Quadrilateral，K3 项选择 Axisymmetric，如图 22-33 所示，单击 OK 按钮。

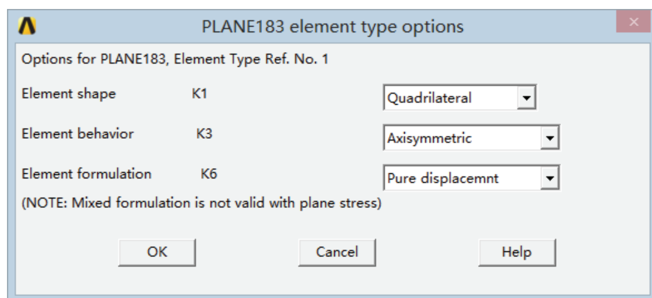


图 22-33 PLANE183 element type options 对话框

（2）更改 CONTAC172 单元分析选项。

继续在 Element Types 对话框中，选择 Type 3 CONTAC172，单击 Options 按钮，在弹出的 CONTA172 element type options 对话框中， K1 项选中 UX/UY/TEMP 分析选项，如图 22-34 所示，单击 OK 按钮。

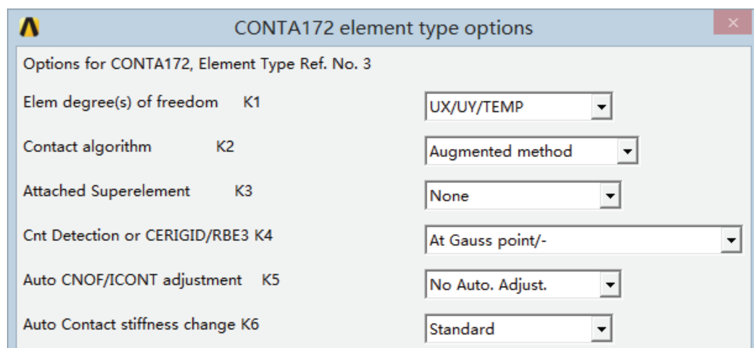


图 22-34 CONTA172 element type options 对话框

继续在 Element Types 对话框中选择 Type 5 CONTAC172，重复以上操作后，单击 Close 按钮，关闭 Element Types 对话框。

5. 定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。

（1）定义内层材料属性。

选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出弹性模量定义对话框，EX 项设为弹性模量 63E9，PRXY 项设为泊松比 0.3，单击 OK 按钮。

继续选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion 菜单命令，弹出材料 1 热膨胀系数定义对话框，ALPX 项设为 2.35E-5，单击 OK

按钮。

（2）定义中间层材料属性。

继续在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认设置 2，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 2 的定义。

选中 Material Model Number 2，执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出弹性模量定义对话框，EX 项设为弹性模量 198E9，PRXY 项设为泊松比 0.3，单击 OK 按钮。

继续选中 Material Model Number 2，执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion 菜单命令，弹出材料 2 热膨胀系数定义对话框，ALPX 项设为 1.6E-5，单击 OK 按钮。

（3）定义外层材料属性。

继续在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认设置 3，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 3 的定义。

选中 Material Model Number 3，执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出弹性模量定义对话框， EX 项设为弹性模量 201E9，PRXY 项设为泊松比 0.3，单击 OK 按钮。

继续选中 Material Model Number 3，执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion 菜单命令，弹出材料 2 热膨胀系数定义对话框，ALPX 项设为 1.28E-5，单击 OK 按钮。

6．定义结构边界条件

（1）定义三层材料上端面 Y 方向的等位移约束。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、Y coordinates、0.09、From Full，如图 22-35 所示，单击 OK 按钮，选中模型上端面节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Couple DOFs 菜单命令，弹出约束定义节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Define Coupled DOFs 对话框，NSET 项设为 1，Lab 项选中 UY，如图 22-36 所示，单击 OK 按钮，定义上端面 Y 方向的等位移约束。

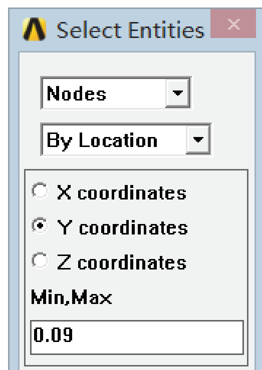


图 22-35　Select Entities 对话框

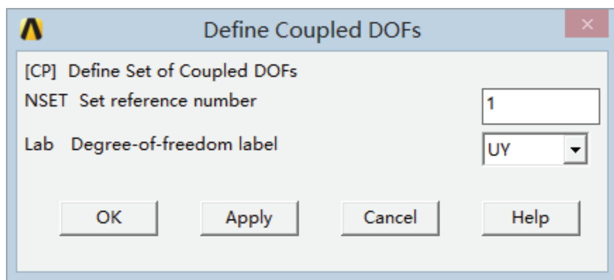


图 22-36　Define Coupled DOFs 对话框

（2）定义内层材料内壁节点 X 方向的等位移约束。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单

命令，弹出实体选取对话框，依次选中 Lines、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出线拾取对话框，选中 List of Items，输入“1”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出实体选取对话框，依次选中 Nodes、Attached to、Lines,all、From Full，单击 OK 按钮，选中线 1 上的所有节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Couple DOFs 菜单命令，弹出约束定义节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Define Coupled DOFs 对话框，NSET 项设为 2，Lab 项选中 UX，单击 OK 按钮，定义内层材料内壁节点 X 方向的等位移约束。

（3）定义内层材料内壁压力载荷。施加 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Pressure→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply PRES on nodes 对话框，VALUE 项设为 0.5E6，如图 22-37 所示，单击 OK 按钮。

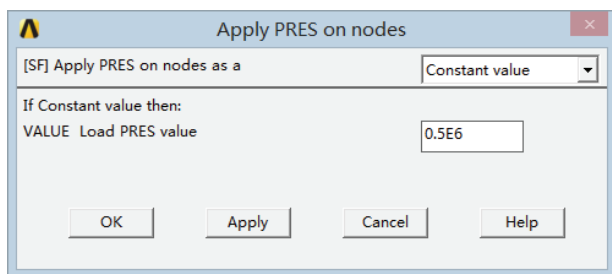


图 22-37 Apply PRES on nodes 对话框

（4）定义 3 层材料下端面 Y 方向的零位移边界。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出实体选取对话框，依次选中 Nodes、By Location、Y coordinates、0、From Full，单击 OK 按钮，选中模型下端面的所有节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply U,ROT on nodes 对话框，Lab2 项选中 UY，VALUE 项设为 0，如图 22-38 所示，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Utility Menu→Plot→Elements 菜单命令，显示单元，施加完载荷和耦合边界条件的有限元模型如图 22-39 所示。

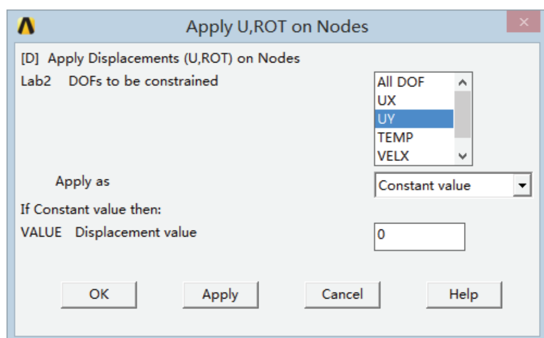


图 22-38 Apply U,ROT on nodes 对话框

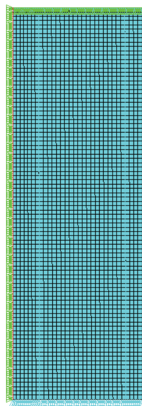


图 22-39 施加完载荷和耦合边界条件的有限元模型

7．设置参考温度

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Settings→Reference Temp 菜单命令，弹出 Reference Temperature 对话框，TREF 项设为 20，单击 OK 按钮。

8．设置求解选项

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Steady-State，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Sol'n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，选中 Basic 标签，在 Analysis Options 中选择 Large Displacement Static，Time at end of loadstep 项设为 1，Number of substeps 设为 8，Max no. of substeps 设为 10，Min no. of substeps 设为 6，Frequency 项选中 Write last substep only，如图 22-40 所示。

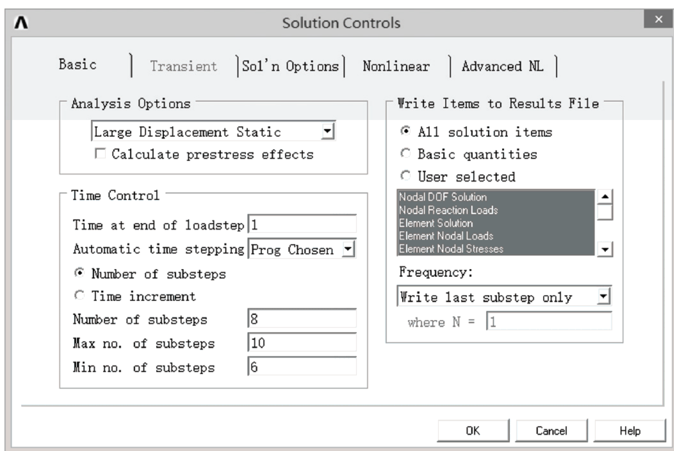


图 22-40　Solution Controls 对话框

9．写结构场物理分析文件

执行 Main Menu→Preprocessor→Physics→Environment→Write 菜单命令，弹出 Physics Write 对话框，Title 项设为 struct，如图 22-41 所示，单击 OK 按钮。

开始读取温度场物理分析文件进行求解和后处理。

1．读取温度场物理分析文件

执行 Main Menu→Preprocessor→Physics→Environment→Read 菜单命令，弹出 Physics Read 对话框，如图 22-42 所示，选中 THERMAL，单击 OK 按钮。

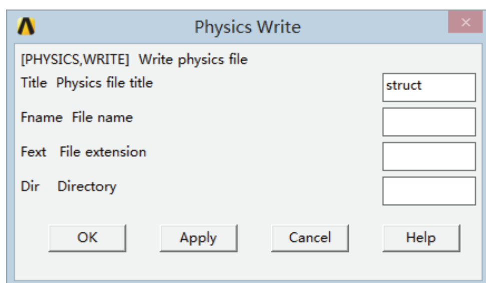


图 22-41　Physics Write 对话框

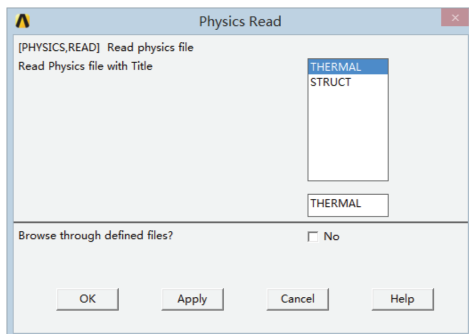


图 22-42　Physics Read 对话框



2．求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行求解。

3．显示温度分布云图

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布如图 22-43 所示。

（3）将 2D 计算结果扩展至 3D。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Symmetry Expansion→2D Axi-Symmetric 菜单命令，弹出 2D Axi-Symmetric Expansion 对话框。在 Select expansion amount 项中选择 3/4 expansion，单击 OK 按钮，得到扩展的温度分布云图如图 22-44 所示。

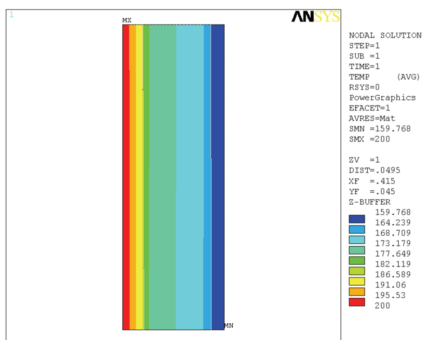


图 22-43　压力容器温度分布云图

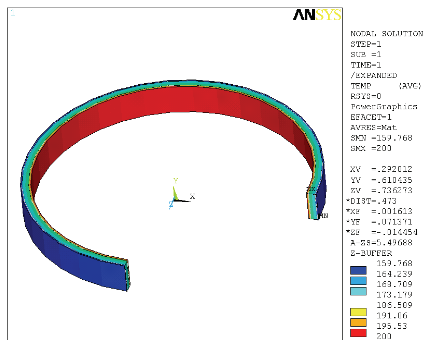


图 22-44　扩展的压力容器温度分布云图

（4）取消扩展。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Symmetry Expansion→2D Axi-Symmetric 菜单命令，在弹出的 2D Axi-Symmetric Expansion 对话框中，选中 No Expansion，单击 OK 按钮。

读取结构场物理分析文件并读取温度场计算结果进行结构场求解和后处理。

1．读取结构场物理分析文件

执行 Main Menu→Preprocessor→Physics→Environment→Read 菜单命令，弹出 Physics Read 对话框，选中 STRUCT，单击 OK 按钮。

2．定义温度边界条件

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Structural→Temperature→From ThermAnaly 菜单命令，弹出 Apply TEMP from Thermal Analysis 对话框，如图 22-45 所示，单击 Browse 按钮，弹出文件读取对话框，选中 rth 文件，选中 Exercise20-1.rth 项，单击 OK 按钮，在 Apply TEMP from Thermal Analysis 对话框单击 OK 按钮。

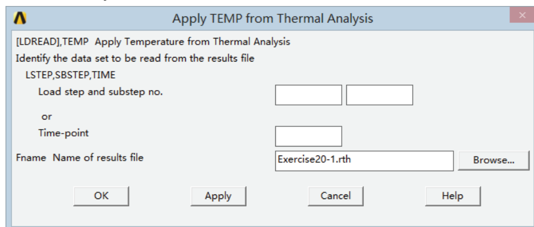


图 22-45　Apply TEMP from Thermal Analysis 对话框

3．求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行求解。

4．显示等效应力分布云图

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Stress 和 von Mises Stress 选项，单击 OK 按钮。所得等效应力分布云图如图 22-46 所示。

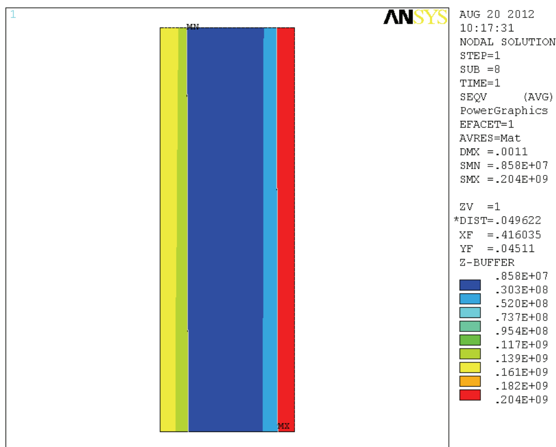


图 22-46　压力容器等效应力分布云图

5．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

22.4.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise24
/PREP7                       !进入前处理器
ET,1,PLANE77                 !选择单元类型
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,1                 !设置单元类型选项
MP,KXX,1,1.63                !定义 1 号材料导热系数
MP,KXX,2,6.52                !定义 2 号材料导热系数
MP,KXX,3,22.6                !定义 3 号材料导热系数
pi=3.1415926
gma=0.5*pi/180               !定义参数
K,,0.4,0.09,0
```

```
K,,0.4,0,0
K,,0.406+0.03*TAN(gma),0,0
K,,0.406,0.09,0                         !建立内层材料的构造关键点
K,,0.406-u2,0.09,0
K,,0.406-u2+0.03*TAN(gma),0,0
K,,0.426+0.03*TAN(gma),0,0
K,,0.426,0.09,0                         !建立中间材料的构造关键点
K,,0.426-u3,0.09,0
K,,0.426-u3+0.03*TAN(gma),0,0
K,,0.430,0,0
K,,0.430,0.09,0                         !建立外层材料的构造关键点
A,1,2,3,4                               !建立内层材料面
A,5,6,7,8                               !建立中间层材料面
A,9,10,11,12                            !建立外层材料面
ASEL,S,,,1
AATT,1,,1                               !设置内层材料面的单元和材料属性
ASEL,S,,,2
AATT,2,,1                               !设置中间层材料面的单元和材料属性
ASEL,S,,,3
AATT,3,,1                               !设置外层材料面的单元和材料属性
ALLSEL,ALL                              !选中所有模型
ESIZE,0.001                             !定义网格尺寸
MSHKEY,2
AMESH,ALL                               !划分网格
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,2,169
ET,3,172
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
R,3,
RMORE,
RMORE,,500
RMORE,0
KEYOPT,3,1,2
! Generate the target surface
```

```
LSEL,S,,,3
CM,_TARGET,LINE
TYPE,2
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
LSEL,S,,,5
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,3
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END         !建立第一层和第二层之间的接触
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
```



```
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0
MAT,1
R,4
REAL,4
ET,4,169
ET,5,172
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
R,4,
RMORE,
RMORE,,500
RMORE,0
KEYOPT,5,1,2
! Generate the target surface
LSEL,S,,,7
CM,_TARGET,LINE
TYPE,4
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
LSEL,S,,,9
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,5
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
```



```
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END       !建立第二层和第三层之间的接触
DL,1, ,TEMP,200,0                       !施加内壁温度边界
SFL,11,CONV,25, ,20,                    !施加外壁对流换热载荷
ANTYPE,STATIC                           !设置为稳态分析
TOFFST,273,                             !设置温度偏移量
ALLSEL,ALL                              !选中所有模型
PHYSICS,WRITE,Thermal, , ,              !写温度场物理分析文件
PHYSICS,CLEAR                           !清空物理环境变量
LSCLEAR,ALL                             !删除温度场所有载荷
ETCHG,TTS                               !将温度场单元转化为结构场单元
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,3,1,1
KEYOPT,5,1,1                            !更改 PLANE82 单元分析选项
MP,EX,1,63E9                            !定义 1 号材料弹性模量
MP,ALPX,1,2.35E-5                       !定义 1 号材料热膨胀系数
MP,PRXY,1,0.3                           !定义 1 号材料泊松比
MP,EX,2,198E9                           !定义 2 号材料弹性模量
MP,ALPX,2,1.6E-5                        !定义 2 号材料热膨胀系数
MP,PRXY,2,0.3                           !定义 2 号材料泊松比
MP,EX,3,201E9                           !定义 3 号材料弹性模量
MP,ALPX,3,1.28E-5                       !定义 3 号材料热膨胀系数
MP,PRXY,3,0.3                           !定义 3 号材料泊松比
NSEL,S,LOC,Y,0.09                       !选定模型顶面的所有节点
CP,1,UY,ALL                             !设置模型顶面节点 Y 向自由度耦合
LSEL,S,,,1                              !选择模型第一层壁内壁线
NSLL,S,1                                !选择模型第一层壁内壁节点
CP,2,UX,ALL                             !选择模型第一层壁内壁节点 X 方向自由度耦合
SF,ALL,PRES,0.5E6                       !施加模型第一层壁内壁节点的压力载荷
```

```
ALLSEL,ALL                              !选中所有模型
NSEL,S,LOC,Y,0                          !选择模型下端面的所有节点
D,ALL, ,0, , , ,UY, , , , ,             !定义模型下端面Y方向的零位移约束
ALLSEL,ALL                              !选中所有模型
/SOLU                                   !进入求解器
TREF,20,                                !定义参考温度
ANTYPE, STATIC                          !定义稳态求解
NLGEOM,1                                !打开大变形效应开关
NSUBST,8,10,6                           !设置求解子步数
TIME,1                                  !设置求解时间
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,LAST                         !输出控制
PHYSICS,WRITE,struct, , ,               !写结构场物理分析文件
FINISH
/SOLU                                   !进入求解器
PHYSICS,READ,THERMAL                    !读取温度场物理分析文件
SOLVE                                   !求解
FINISH
/POST1                                  !进入通用后处理器
PLNSOL, TEMP,, 0                        !显示温度分布云图
/EXPAND,27,AXIS,,,10                    !设置三维周期扩展选项
PLNSOL, TEMP,, 0                        !显示三维扩展的温度云图
/EXPAND,                                !取消三维周期扩展
FINISH
/SOLU                                   !进入求解器
PHYSICS,READ,STRUCT                     !读取结构场物理分析文件
LDREAD,TEMP,,, , ,'Exercise23','rth',' ' !读取温度分析结果
SOLVE                                        !进行求解计算
/POST1                                  !进入通用后处理器
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0                    !显示等效应力分布云图
FINISH
/EXIT,NOSAV                             !退出 ANSYS
```

22.5 实例 2——钢水凝固过程热应力耦合分析

22.5.1 问题描述

应用热-结构耦合场对钢水充满模具后的降温过程得出温度分布和模具内部的应力场变化。模具和钢水的几何模型及几何尺寸如图 22-47 所示。钢水和模具的材料性能列于表 22-5、表 22-6 和表 22-7。由于模拟的为钢水凝固过程，因此其力学性能参数取铸铁的参数。试计算半小时内的钢水部分及模具部分的温度和应力分布变化过程。

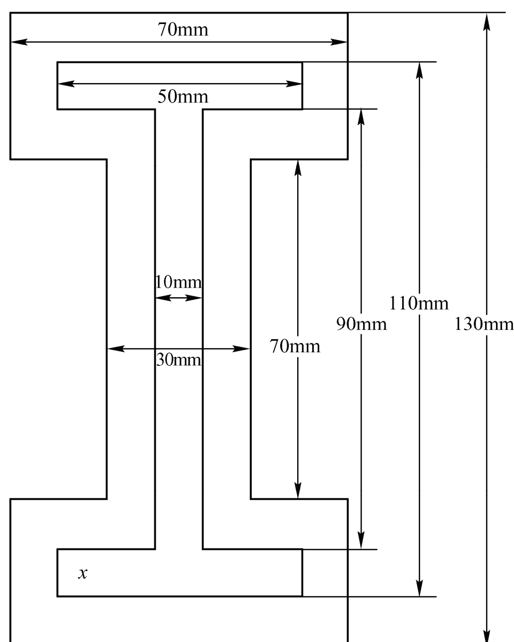


图 22-47　模具和钢水的几何模型及几何尺寸

表 22-5　钢水的热传导系数和焓值

温度/℃	0	1533	1595	1670
热传导系数 W/(m•K)	28.8	31.2	24.4	24.4
焓值 J/m^3	0	7.5E9	9.6E9	105E9

表 22-6　钢水的其他热性能参数

项　　目	弹性模量/Pa	泊松比	热膨胀系数 1/℃
数据	15E10	0.3	12.2E-5

表 22-7　模具的材料性能参数

项目	导热系数 W/(m•K)	密度 kg/m^3	比热容 J /(kg•℃)	弹性模型 Pa	热膨胀系数 1/℃	泊松比
数据	0.52	1630	1120	1.25×10^{10}	1.1×10^{-6}	0.28

22.5.2 问题分析

本例为瞬态问题，采用直接热-应力耦合分析方法，选用耦合场二维 4 节点 PLANE13 平面单元。分析时，采用国际单位制，温度采用℃。

22.5.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise22-2”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，在弹出的 Library of Element Types 对话框中选择 Plane13 单元，即先选中 Coupled Field，再在右侧选择 Vector Quad 13，如图 22-48 所示，单击 OK 按钮。

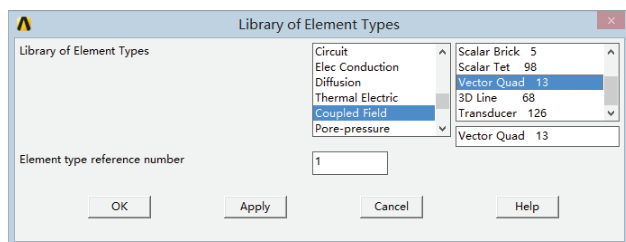


图 22-48　Library of Element Types 对话框

在 Element Types 对话框中，选中 Type 1 PLANE13，单击 Options 按钮，弹出 PLANE13 element type options 对话框，K1 项选择 UX UY TEMP AZ，K3 项选择 Plane stress，如图 12-49 所示，单击 OK 按钮。

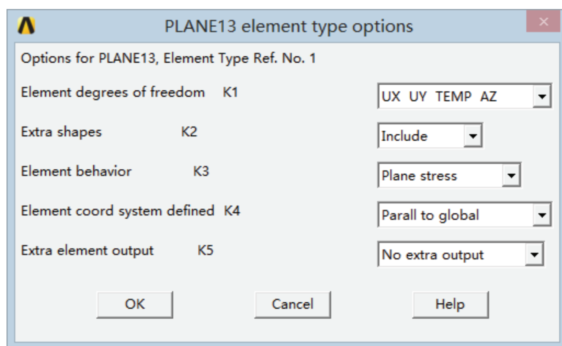


图 12-49　PLANE13 element type options 对话框

在 Element Types 对话框中，单击 Close 按钮。

3．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。

（1）定义模具材料属性。

1）定义模具的导热系数。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available →Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，KXX 项设为 0.52，单击 OK 按钮。

2）定义模具的密度。继续执行 Material Models Available→Thermal→Density 菜单命令，弹出 Density for Material Number 对话框，定义 1 号材料的密度。DENS 项设为 1630，单击 OK 按钮。

3）定义模具的比热容。继续执行 Material Models Available→Thermal→Specific Heat 菜单命令，弹出 Specific Heat for Material Number 对话框，定义 1 号材料的比热容。C 项设为 1120，单击 OK 按钮。

4）定义模具的弹性模量和泊松比。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，EX 项设为 1.25E10，PRXY 项设为 0.28，单击 OK 按钮。

5）定义模具的热膨胀系数。执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic 菜单命令， ALPX 项设为 1.1E-6，单击 OK 按钮。

（2）定义钢材的材料属性。

1）定义钢材的导热系数。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available →Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，弹出 Conductivity for Material Number 2 对话框，定义钢材的导热系数。在对话框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T4，按照表 22-5 输入钢材的导热系数，如图 22-50 所示。单击右下角的 Graph 按钮，钢材导热系数随温度的变化曲线如图 22-51 所示，单击 OK 按钮。

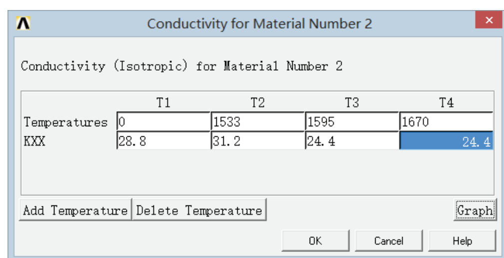


图 22-50 Conductivity for Material Numder 2 对话框

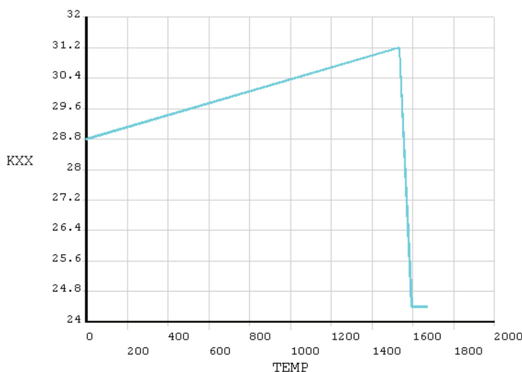


图 22-51 钢材导热系数随温度的变化曲线

2）定义钢材的焓值。继续执行 Material Models Available→Thermal→Enthalpy 菜单命令，弹出 Enthalpy for Material Number 2 对话框，单击对话框左下角的 Add Temperature 按钮，增加温度项到 T4，按照表 22-5 输入材料参数，如图 22-52 所示。单击右下角的 Graph 按钮，钢材焓值随温度的变化曲线如图 22-53 所示，单击 OK 按钮。

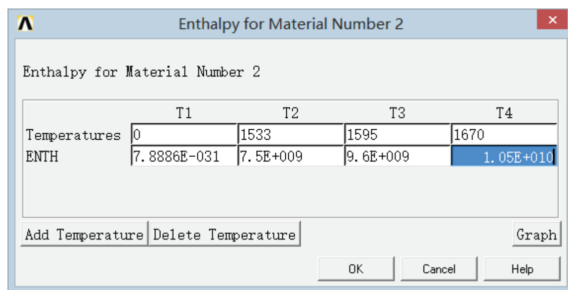


图 22-52 Enthalpy for Material Number 2 对话框

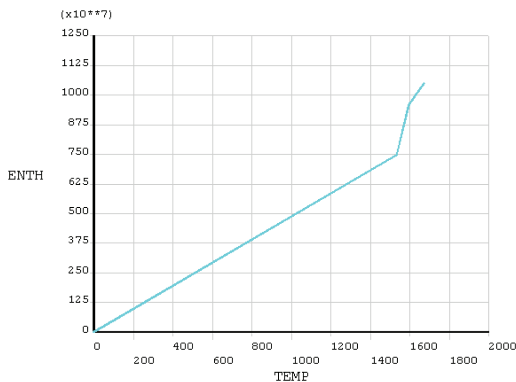


图 22-53 钢材焓值随温度的变化曲线

3）定义模具的弹性模量和泊松比。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令， EX 项设为 15E10，PRXY 项设为 0.3，单击 OK 按钮。

4）定义模具的热膨胀系数。执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic 菜单命令，ALPX 项设为 12.2E-6，单击 OK 按钮。

4．定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

```
wd=90e-3
hg1=20e-3
hg2=10e-3
R1=40E-3
R2=25E-3
R3=10E-3
SR1=6E-3
SR2=4E-3
T1=600
T2=10
AP=200                    !定义参数
```

5．建立几何模型

（1）初步建立几何模型。

1）建立底部模具。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Rectangle by Dimensions 对话框，依次在 X1、X2、Y1、Y2 中输入“-0.5*L4”“0.5*L4”“0”“0.5*(H4-H1)”，单击 Apply 按钮。

2）建立底部钢水。继续在 X1、X2、Y1、Y2 中输入“-0.5*L3”“0.5*L3”“0.5*(H4-H3)“0.5*(H4-H2)”，单击 Apply 按钮。

3）建立中部钢水。继续在 X1、X2、Y1、Y2 中输入“-0.5*L1”“0.5*L1”“0.5*(H4-H2)”“0.5*(H4+H2)”，单击 Apply 按钮。

4）建立中部模具。继续在 X1、X2、Y1、Y2 中输入“-0.5*L2”“0.5*L2”“0.5*(H4-H1)”“0.5*(H4+H1)”，单击 Apply 按钮。

5）建立顶部模具。继续在 X1、X2、Y1、Y2 中输入“-0.5*L4”“0.5*L4”“0.5*(H4+H1)”“H4”，单击 Apply 按钮。

6）建立顶部钢水。继续在 X1、X2、Y1、Y2 中输入“-0.5*L3”“0.5*L3”“0.5*(H4+H2)”“0.5*(H4+H3)”，单击 OK 按钮。

（2）进行搭界布尔操作。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Overlap→Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮选中模型所有部分。

（3）进行粘接布尔操作。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮，选中模型所有部分。

（4）将编号压缩。执行 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers 菜单命令，弹出 Compress Numbers 对话框，Label 项选中 All，如图 22-54 所示，单击 OK 按钮，将模型的所有图元的编号进行压缩。

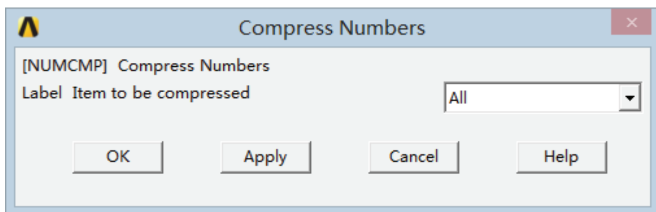


图 22-54 Compress Numbers 对话框

6．赋予模型材料和单元属性

（1）赋予钢水材料属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取图 22-47 所示的中间部分区域，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框， MAT 项选中 2，TYPE 项选中 1 PLANE13，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（2）赋予模具材料属性。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Areas、By Attributes、Material num、Min,Max,Inc 项设为 2，选中 Unselect，如图 22-55 所示，单击 OK 按钮，选中模具部分面。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮选中所有模具部分面，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项选中 1，TYPE 项选中 1 PLANE13，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，Elem/Attrib numbering 项选中 Material numbers，/num 项选中 Colors only，/REPLOT 项选中 Replot，单击 OK 按钮，绘制的几何模型图如图 22-56 所示。

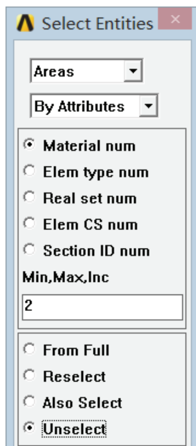


图 22-55 Select Entities 对话框

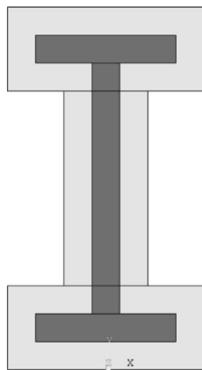


图 22-56 模具及钢水几何模型图

7．划分单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，在弹出的 Global Element Sizes 对话框中，SIZE 项设为 0.002，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Target Surf 菜单命令，单击 Pick All 按钮，生成有限元模型。

8．施加边界条件

（1）施加外对流边界条件。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Lines、Exterior、From Full，如图 22-57 所示，单击 OK 按钮，选中模型外表面的线，如图 22-58 所示。

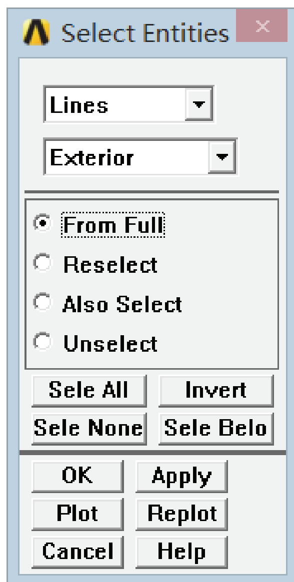


图 22-57　Select Entities 对话框

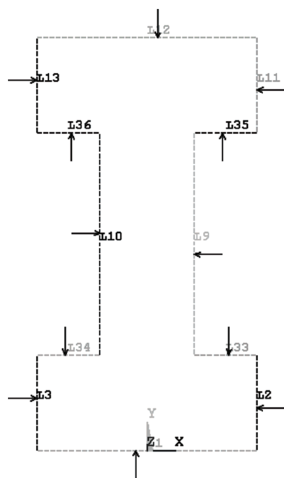


图 22-58　模型外表面选中线模型图

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，单击 Pick All 按钮，选中所有已选中的线，弹出 Apply CONV on lines 对话框，VALI 项设为 65，VAL2I 项设为 25，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，选中 LINE 项，Elem/Attrib numbering 项选中 no numbering，/num 项选中 Colors and numbers，/REPLOT 项选中 Replot，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（2）施加模具和钢水的初始温度。

1）施加钢水初始温度。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Areas、By Attributes、Material num，Min，Max，Inc 项设为 2，选中 From Full，如图 22-59 所示，单击 Apply 按钮。

继续依次选中 Nodes、Attached to、Areas,all、From Full，如图 22-60 所示，单击 OK 按钮，选中钢水的所有组成节点。

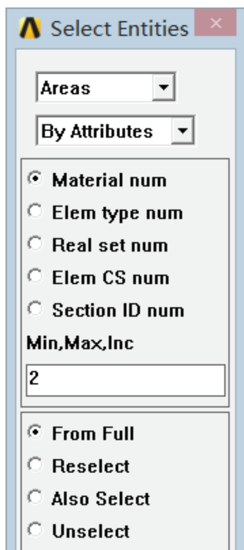


图 22-59 Select Entities 对话框 1

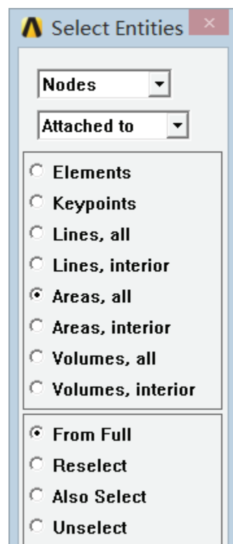


图 22-60 Select Entities 对话框 2

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply TEMP on Nodes 对话框，依次选中 TEMP、Constant value，VALUE 项设为 1670，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

2）施加模具初始温度。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Areas、By Attributes、Material num，Min,Max,Inc 项设为 1，选中 From Full，单击 Apply 按钮。

继续依次选中 Nodes、Attached to、Areas,all、From Full，单击 OK 按钮，选中模具的所有组成节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply TEMP on Nodes 对话框，依次选中 TEMP、Constant value，VALUE 项设为 25，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（3）施加位移约束。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、Y coordinates，Min,Max 项设为 0，选中 From Full，如图 22-61 所示，单击 OK 按钮，选中模具底面的所有节点。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，Lab2 项选中 UY，VALUE 项设为 0，如图 22-62 所示，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、Y coordinates，Min,Max,Inc 项设为 0，选中 From Full，单击 Apply 按钮，再依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，Min,Max,Inc 项设为-0.5*L4，选中

Reselect 项，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，Lab2 项选中 UX，VALUE 项设为 0，单击 OK 按钮。

（4）施加磁势约束条件。

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→VectorPoten →On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply A on Nodes 对话框，Lab 项选中 AZ，VALUE 项设为 0，如图 22-63 所示，单击 OK 按钮。

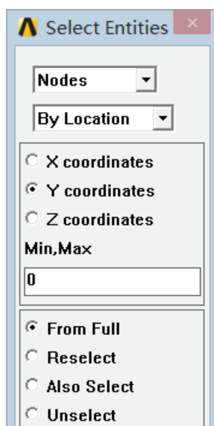


图 22-61　Select Entities 对话框

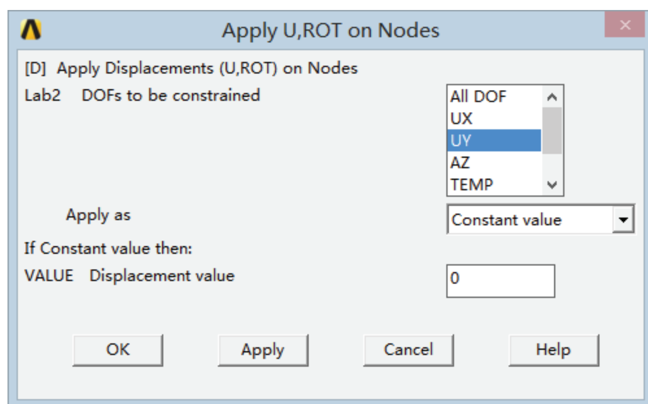


图 22-62　Apply U,ROT on Nodes 对话框

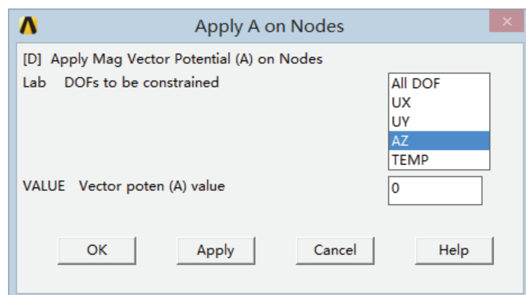


图 22-63　Apply A on Nodes 对话框

9．稳态求解的设置

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient，单击 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，接受默认设置，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Time/Frequenc→Time Integration→Amplitude Decay 菜单命令，弹出 Time Integration Controls 对话框，将 TIMINT 设置为 OFF，如图 22-64 所示，其他项保留默认设置，单击 OK 按钮，即可以定义为稳态分析。

执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Time/Frequenc→Time-Time Step 菜

单命令，弹出 Time and Time Step Options 对话框， TIME 项设为 0. 01，DELTIM 项也设置为 0.01，其他项取默认设置，如图 22-65 所示，单击 OK 按钮。

10. 设置温度偏移

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Full Transient Analysis 对话框，TOFFST 项设为 273，其他项保留默认设置，如图 22-66 所示，单击 OK 按钮。

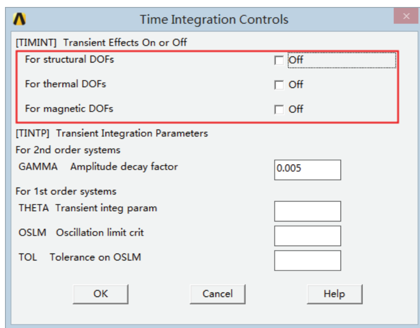


图 22-64 Time Integration Controls 对话框

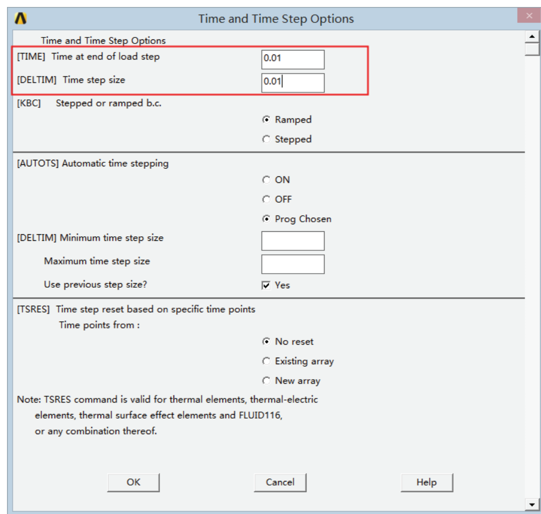


图 22-65 Time and Time Step Options 对话框

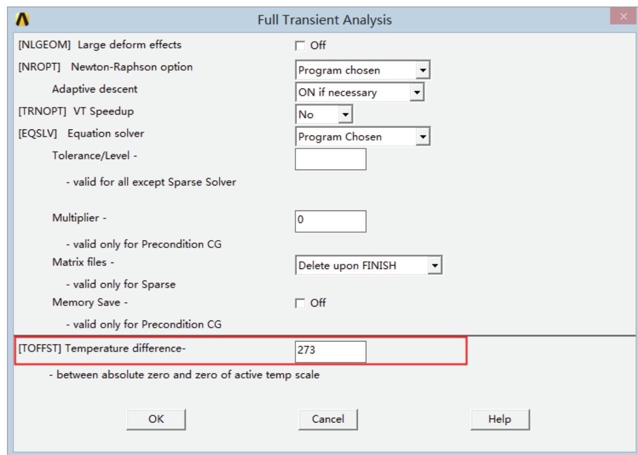


图 22-66 Full Transient Analysis 对话框

11. 求解并存盘

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS 工具条中的 Save_DB 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算并存盘。

12. 删除节点温度

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Delete→Thermal→Temperature→On Nodes 菜

单命令，单击 Pick All 按钮，删除稳态分析定义的节点温度。

13．瞬态求解的设置

执行 Main Menu→Solution→Loads→Loads Step Opts→Time/Frequenc→Time Integration→Newmark Parameters 菜单命令，弹出 Time Integration Controls 对话框，将 TIMINT 设置为 ON，如图 22-67 所示，其他项保留默认设置，单击 OK 按钮，即可以定义为瞬态分析。

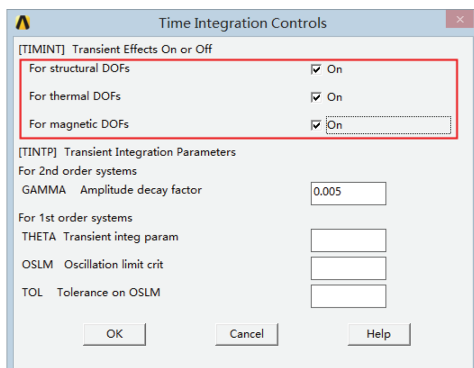


图 22-67 Time Integration Controls 对话框

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Sol'n Controls 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，选中 Basic 标签，在 Analysis Options 中选中 Small Displacement Transient，将 Time Control 的 Time at end of loadstep 项设为 1800，选中 Time increment，Time step size 项设为 30，Minimum time step 项设为 3，Maximum time step 项设为 750。Write Items to Results File 项选中 All solution items，Frequency 项选中 Write every substep，如图 22-68 所示，单击 OK 按钮。

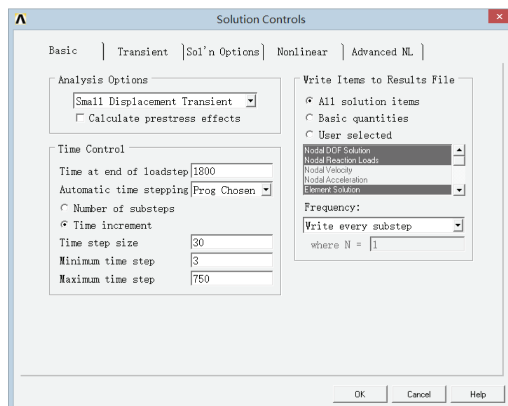


图 22-68 Solution Controls 对话框

14．求解并存盘

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS 工具条中的 Save_DB 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算并存盘。

15．显示各时间步温度场和应力场分布云图

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出

Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（1）显示 10 min 时温度场和应力场分布云图。

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→By Pick 菜单命令，弹出 Results File 对话框，如图 22-69 所示，选中 Set 21，Time 600.01，单击 Read 按钮，读取该时间步的计算结果。单击 Close 按钮，关闭 Results File 对话框。

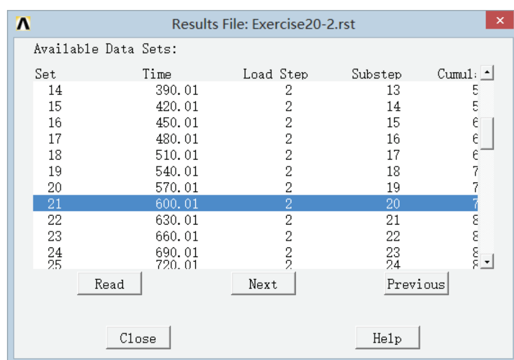


图 22-69　Results File 对话框

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。依次选中 Nodal Solution→Nodal Temperature，单击 OK 按钮。得 10 min 的温度分布云图如图 22-70 所示。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Stress 和 von Mises Stress 选项，单击 OK 按钮。所得 10 min 的等效应力分布云图如图 22-71 所示。

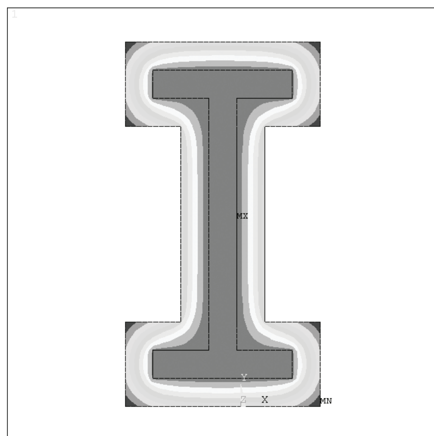


图 22-70　10min 的温度分布云图

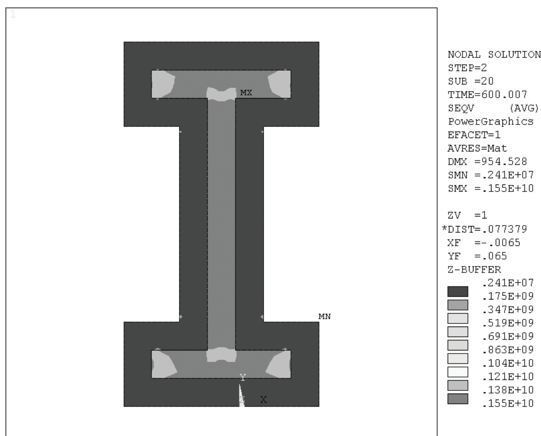


图 22-71　10 min 的等效应力分布云图

（2）显示 20 min 时温度场和应力场分布云图。

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→By Pick 菜单命令，弹出 Results File 对话框，选中 Set 41，Time1200.0，单击 Read 按钮，读取该时间步的计算结果。单击 Close 按钮，关闭 Results File 对话框。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。依次选中 Nodal Solution→Nodal Temperature，单击 OK 按钮。得 20 min 的温度分布云图如图 22-72 所示。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Stress 和 von Mises Stress 选项，单击 OK 按钮。得 20 min 的等效应力分布云图如图 22-73 所示。

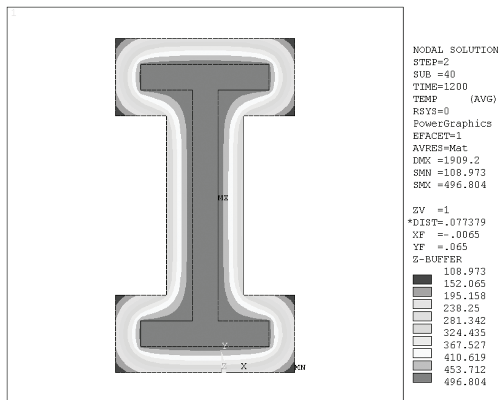


图 22-72　20 min 的温度分布云图

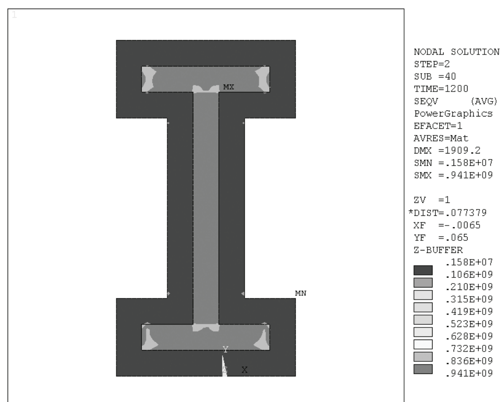


图 22-73　20 min 的等效应力分布云图

（3）显示 30 min 时温度场和应力场分布云图。

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→By Pick 菜单命令，弹出 Results File 对话框，选中 Set 61，Time1800.0，单击 Read 按钮，读取该时间步的计算结果。单击 Close 按钮，关闭 Results File 对话框。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。依次选中 Nodal Solution→Nodal Temperature，单击 OK 按钮。得 30 min 的温度分布云图如图 22-74 所示。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Stress 和 von Mises Stress 选项，单击 OK 按钮。得 30 min 的等效应力分布云图如图 22-75 所示。

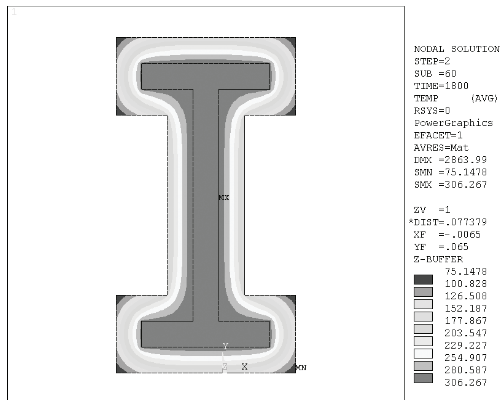


图 22-74　30 min 的温度分布云图

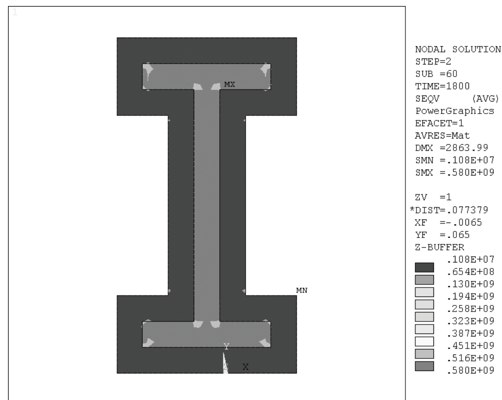


图 22-75　30 min 的等效应力分布云图

16. 退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。



22.5.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise20-2
/prep7                                  !进入前处理器
et,1,plane13                            !选择单元类型
keyopt,1,1,4                            !定义单元分析选项
mp,dense,1,1630                         !定义模具密度
mp,kxx,1,0.52                           !定义模具导热系数
mp,c,1,1120                             !定义模具比热容
mp,ex,1,1.25e+10                        !定义模具弹性模量
mp,alpx,1,1.1e-6                        !定义模具热膨胀系数
mp,nuxy,1,0.28                          !定义模具泊松比
mptemp,1,0,1533,1595,1670               !定义温度数组
mpdata,kxx,2,1,28.8,31.2,24.4,24.4      !定义钢材随以上温度数组变化的热膨胀系数
mpdata,enth,2,1,0,7.5e9,9.6e9,1.05e10   !定义钢材随以上温度数组变化的焓值
mp,ex,2,15e+10                          !定义钢材弹性模量
mp,alpx,2,12.2e-6                       !定义钢材热膨胀系数
mp,nuxy,2,0.3                           !定义钢材泊松比
L1=10E-3
L2=30E-3
L3=50E-3
L4=70E-3
H1=70E-3
H2=90E-3
H3=110E-3
H4=130E-3                                               !定义参数
rectng,-0.5*L4,0.5*L4,0,0.5*(H4-H1)                     !建立底部模具
rectng,-0.5*L3,0.5*L3,0.5*(H4-H3), 0.5*(H4-H2)          !建立底部钢水
rectng,-0.5*L1,0.5*L1,0.5*(H4-H2), 0.5*(H4+H2)          !建立中部钢水
rectng,-0.5*L2,0.5*L2,0.5*(H4-H1), 0.5*(H4+H1)          !建立中部模具
rectng,-0.5*L4,0.5*L4,0.5*(H4+H1),H4                    !建立顶部模具
rectng,-0.5*L3,0.5*L3,0.5*(H4+H2), 0.5*(H4+H3)          !建立顶部钢水
aovlap,all                                              !对所有面进行搭接操作
aglue,all                                               !对所有面进行粘贴操作
numcmp,all                                              !压缩所有编号
FLST,5,5,5,ORDE,4
FITEM,5,1
FITEM,5,-2
FITEM,5,5
FITEM,5,-7
ASEL,S, , ,P51X
AATT,2,,1                                               !定义钢材材料和单元属性
```

```
ALLSEL,ALL
ASEL,U,MAT,,2
AATT,1,,1                         !定义模具材料和单元属性
ALLSEL,ALL                        !选中所有模型
/PNUM,MAT,1                       !按照面材料属性编号
ESIZE,0.002                       !定义单元尺寸
MSHKEY,2                          !设置单元划分选项
AMESH,ALL                         !进行面网格划分
lplot,all                         !显示线
/pnum,line,1                      !显示线编号
/replot
allsel,all                        !选中所有模型
lsel,s,ext                        !选中模型外表面线
sfl,all,conv,65,,25               !施加对流换热边界
allsel,all                        !选中所有模型
FINISH
/SOL                              !进入求解器
antype,trans                      !定义瞬态分析选项
timint,off,all                    !关闭瞬态积分效应
time,0.01                         !定义时间步
deltim,0.01                       !定义时间子步
asel,s,mat,,2
nsla,s,1
d,all,temp,1670                   !定义钢材初始温度值
allsel,all                        !选中所有模型
asel,s,mat,,1
nsla,s,1
d,all,temp,25                     !定义模具初始温度值
allsel,all                        !选中所有模型
nsel,s,loc,y,0
d,all,uy                          !定义模型底面 Y 方向零位移
allsel
nsel,s,loc,y,0
nsel,r,loc,x,-0.5*L4
d,all,ux
allsel
D,ALL,AZ                          !定义模型零磁位
solve                             !进行求解
ddele,all,temp                    !删除所有温度载荷
timint,on,all                     !打开瞬态积分效应
time,1800                         !定义求解时间
autots,-1                         !程序选择是否使用自动时间步
deltim,30,3,750,1                 !定义时间步
outres,all,all                    !定义输出控制
solve                             !进行求解
FINISH
```

```
/POST1                              !进入后处理
SET,LIST,999
SET,,, ,,, ,21                      !选择 10min 的载荷步
PLNSOL, TEMP,, 0,1.0                !显示 10min 的温度分布云图
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0                !显示 10min 的应力分布云图
SET,LIST,999
SET,,, ,,, ,41                      !显示 20min 的温度分布云图
PLNSOL, TEMP,, 0,1.0                !显示 20min 的温度分布云图
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0                !显示 20min 的应力分布云图
SET,LIST,999
SET,,, ,,, ,61                      !显示 30min 的温度分布云图
PLNSOL, TEMP,, 0,1.0                !显示 20min 的温度分布云图
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0                !显示 20min 的应力分布云图
FINISH
/EXIT,NOSAV                         !退出 ANSYS
```

22.6 实例 3——圆柱形坯料的电热耦合分析

22.6.1 问题描述

本实例对一个圆柱形坯料的电磁感性加热过程进行电磁热的耦合分析。圆柱形坯料及加热线圈的几何模型如图 22-76 所示，模型包括坯料、线圈和空气，其对应几何尺寸列于表 22-8。线圈内承载 15×10^6 A/m^2 的电流密度，线圈与坯料之间以及线圈以内为空气，坯料中心位置以及空气最外侧加载零磁位，电磁场边界如图 22-77 所示。坯料上下面以及中心面绝热，无热交换，外侧与环境进行辐射换热，环境温度为 25℃，热场边界条件如图 22-78 所示。

空气和线圈的相对磁导率均为 1，钢坯料的热辐射系数为 0.68，其他钢坯材料属性均随温度变化，钢坯料相对磁导率随温度的变化列于表 22-9，电阻值随温度的变化列于表 22-10，焓值随温度的变化列于表 22-11，热传导系数随温度的变化列于表 22-12。

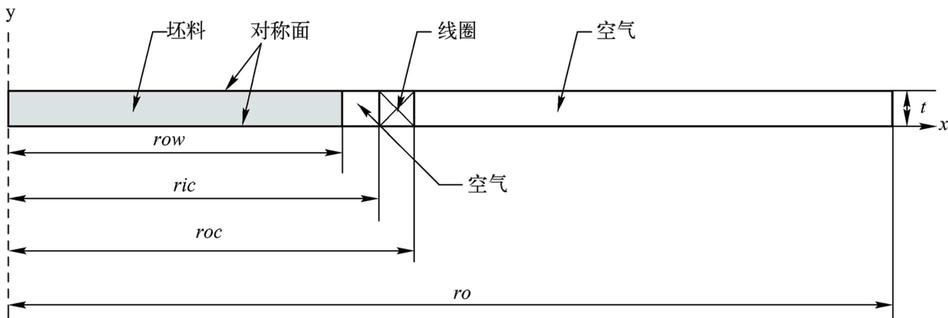


图 22-76 圆柱形坯料及加热线圈几何模型

表 22-8 模型几何尺寸/mm

参 数	*row*	*ric*	*roc*	*ro*	*t*
数 值	15.0	17.5	20.0	50.0	1

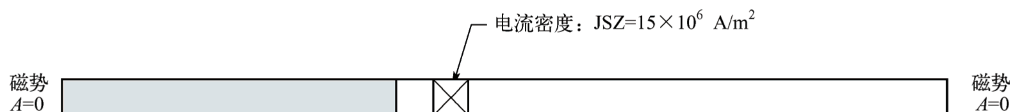


图 22-77 圆柱形坯料及加热线圈电磁场边界条件

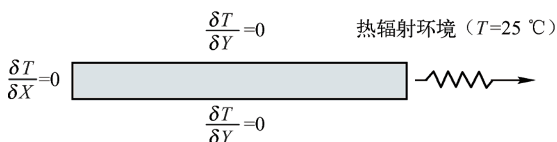


图 22-78 圆柱形坯料热场边界条件

表 22-9 钢坯料相对磁导率随温度变化列表

温度/℃	25.5	160	291.5	477.6	635	698	709	720.3	742	761	1000
相对磁导率	200	190	182	161	135	104	84	35	17	1	1

表 22-10 钢坯料电阻值随温度变化列表

温度/℃	0	125	250	375	500	625	750	875	1000
电阻率/（Ω•m）	1.84E-7	2.72E-7	3.84E-7	5.12E-7	6.56E-7	8.24E-7	1.032E-7	1.152E-7	1.2E-7

表 22-11 钢坯料焓值随温度变化列表

温度/℃	0	27	127	327	527	727	765	765.001	927
焓值（/J/m³）	0	91609056	453285756	1.2748e9	2.2519e	93.3396e9	3.548547e9	3.548556e9	4.3520e9

表 22-12 钢坯料导热系数随温度变化列表

温度/℃	0	730	930	1000
导热系数/（W/(m•K)）	60.64	29.5	28	28

22.6.2 问题分析

本例为电磁热耦合分析问题，应用多物理场耦合间接耦合场分析方法对钢坯料的电磁感应加热过程进行分析。本问题属于轴对称问题，电磁分析采用二维八节点 PLANE53 平面单元进行分析，热分析采用二维四节点 PLANE55 单元进行分析。

分析时，采用国际单位制，温度采用℃。

22.6.3 GUI 操作步骤

1. 进行电磁分析的前处理

（1）定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise22-3”，单击 OK 按钮。

（2）定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的

Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Magnetic Vector 和 Quad 8 node 53，如图 22-79 所示，单击 Apply 按钮，定义 1 号单元为 PLANE53，重复以上操作，定义 2 号单元为 PLANE53，单击 OK 按钮。

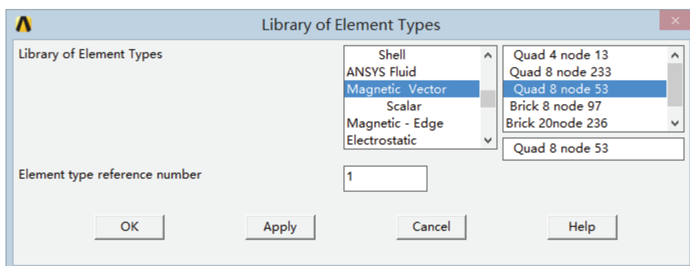


图 22-79　Library of Element Types 对话框

在 Element Types 对话框中，选中 Type 1 PLANE53，单击 Options 按钮，弹出 PLANE53 element type options 对话框，K1 项选择 AZ，K3 项选择 Axisymmetric 轴对称分析选项，如图 22-80 所示。重复以上操作，将 Type 2 PLANE53 也按照上述操作设置好，再单击 OK 按钮。在 Element Types 对话框中单击 Close 按钮。

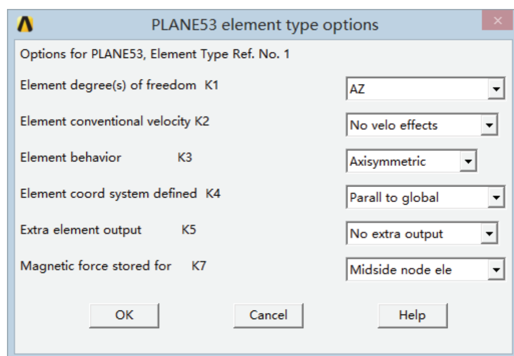


图 22-80　PLANE53 element type options 对话框

（3）定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

```
row=.015                                  !坯料半径
ric=.0175                                 !线圈内半径
roc=.0200                                 !线圈外半径
ro=.05                                    !空气模拟外半径
t=.001                                    !模型轴向厚度
freq=150000                               !加热频率(Hz.)
pi=4*atan(1)                              !pi
cond=.392e7                               !最大热传导系数
muzero=4e-7*pi                            !自由空间的磁导率
mur=200                                   !最大相对磁导率
skind=sqrt(1/(pi*freq*cond*muzero*mur))   !集肤效应深度
ftime=3                                   !计算时间
tinc=.05                                  !谐响应分析时间
time=0                                    !初始计算时间
```

delt=.01 !最大时间

（4）选择电磁分析单位

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Electromag Units 菜单命令，弹出 Electromagnetic Units 对话框，选中 MKS system 单选按钮，如图 22-81 所示，单击 OK 按钮。

（5）定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。

1）定义 1 号空气材料磁导率。选中 Material Model Number 1，在对话框右侧执行 Electromagneics→Relative Permeability→Constant，弹出 Permeability for Material Number 1 对话框，MURX 项设为 1，如图 22-82 所示，单击 OK 按钮。

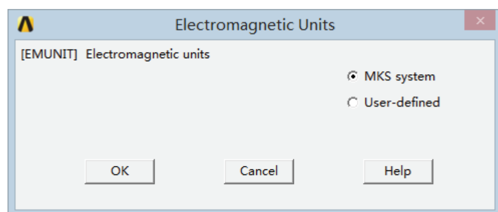


图 22-81 Electromagnetic Units 对话框

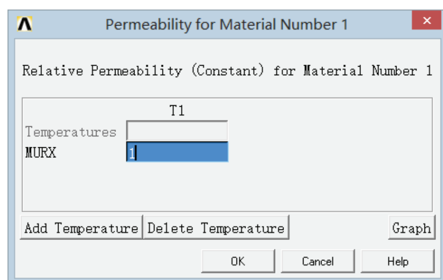


图 22-82 Permeability for Material Number 1 对话框

2）定义 2 号坯料材料属性。在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material →New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认设置 2，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 2 的定义。

① 定义与温度相关的磁导率参数。选中 Material Model Number 2，在对话框右侧执行 Electromagneics→Relative Permeability→Constant，弹出 Permeability for Material Number 2 对话框，在对话框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T11，按照表 22-9 输入钢坯料随温度变化的磁导率，单击右下角的 Graph 按钮，绘制钢坯料磁导率随温度的变化曲线图，如图 22-83 所示，单击 OK 按钮。

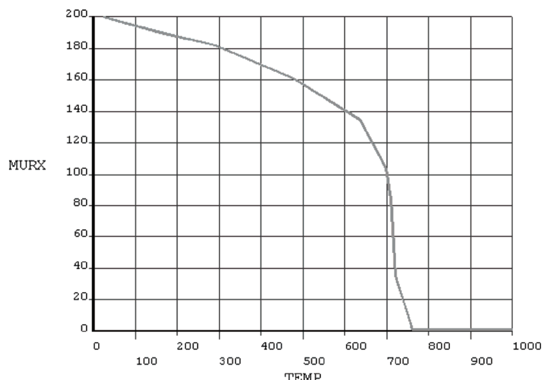


图 22-83 钢坯料磁导率随温度变化曲线图

② 定义与温度相关的电阻率参数。选中 Material Model Number 2，在对话框右侧执行 Electromagneics→Resistivity→Constant，弹出 Resistivity for Material Number 2 对话框，在对话

框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T9，按照表 22-10 输入钢坯料随温度变化的电阻率，单击右下角的 Graph 按钮，绘制钢坯料电阻率随温度变化的曲线图，如图 22-84 所示，单击 OK 按钮。

③ 定义与温度相关的焓参数。选中 Material Model Number 2，在对话框右侧执行 Material Models Available→Thermal→Enthalpy，弹出 Enthalpy for Material Number 2 对话框，单击对话框左下角的 Add Temperature，增加温度项到 T9，按照表 22-11 输入钢坯料随温度变化的焓参数，单击右下角的 Graph 按钮，绘制钢坯料焓参数随温度变化的曲线图如图 22-85 所示，单击 OK 按钮。

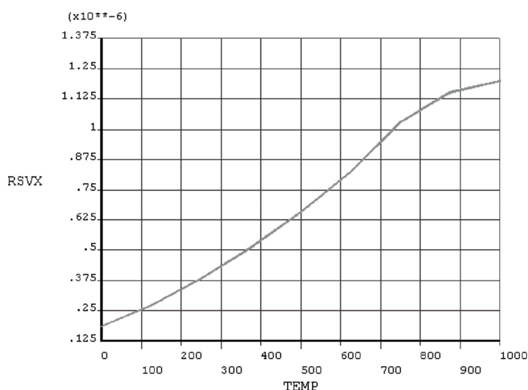


图 22-84 钢坯料电阻率随温度变化曲线图

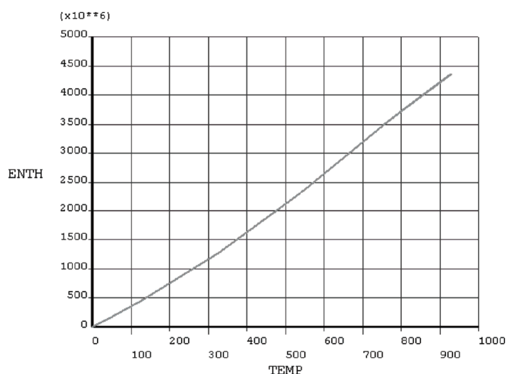


图 22-85 钢坯料焓参数随温度变化曲线图

④ 定义与温度相关的热传导参数。选中 Material Model Number 2，在对话框右侧执行 Material Models Available→Thermal→Enthalpy，弹出 Enthalpy for Material Number 2 对话框，单击对话框左下角的 Add Temperature，增加温度项到 T4，按照表 22-12 输入钢坯料随温度变化的热传导参数，单击右下角的 Graph 按钮，绘制钢坯料热传导系数随温度变化的曲线图如图 22-86 所示，单击 OK 按钮。

⑤ 定义热辐射参数。选中 Material Model Number 2，在对话框右侧执行 Material Models Available→Thermal→Emissivity，弹出 Emissivity for Material Number 2 对话框， EMIS 项设为 0.68，如图 22-87 所示，单击 OK 按钮。

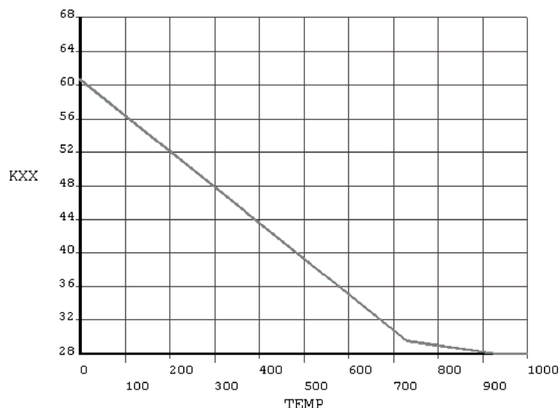


图 22-86 钢坯料热传导系数随温度变化曲线图

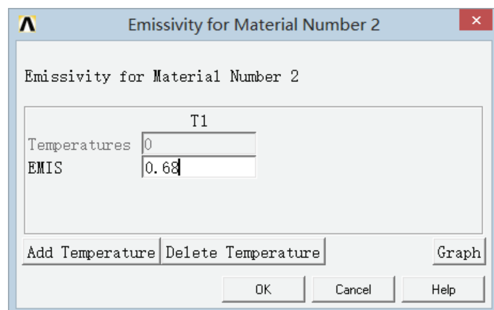


图 22-87 Emissivity for Material Number 2 对话框

3）定义 3 号线圈材料磁导率。在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认设置 3，单击 OK 按钮，完成 Material Model Number 3 的定义。

选中 Material Model Number 3，在对话框右侧执行 Electromagneics→Relative Permeability→Constant，弹出 Permeability for Material Number 3 对话框，NURX 项设为 1，单击 OK 按钮。

（6）建立几何模型

1）建立钢坯料几何模型。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Rectangle→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Rectangle Dimension 对话框，X1、X2、Y1、Y2 分别设为 0、row、0、t，单击 Apply 按钮。

2）建立钢坯料和线圈间的空气几何模型。继续在 Create Rectangle Dimension 对话框中将 X1、X2、Y1、Y2 分别设为 row、ric、0、t，单击 Apply 按钮。

3）建立线圈的几何模型。继续在 Create Rectangle Dimension 对话框中将 X1、X2、Y1、Y2 分别设为 ric、roc、0、t，单击 Apply 按钮。

4）建立线圈外面空气的几何模型。继续在 Create Rectangle Dimension 对话框中将 X1、X2、Y1、Y2 分别设为 roc、ro、0、t，单击 OK 按钮。

5）进行粘接各矩形操作。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮。

6）压缩面编号。执行 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers 菜单命令，弹出 Compress Numbers 对话框，选中 Areas，如图 22-88 所示，单击 OK 按钮。

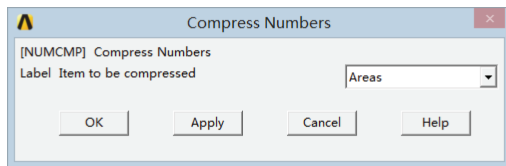


图 22-88 Compress Numbers 对话框

最终建立的几何模型如图 22-89 所示。



图 22-89 所建立的几何模型图

（7）设置单元密度

1）钢坯料横向单元密度设置。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Keypoints、By Location、X coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“row”，选中 From Full 单选按钮，如图 22-90 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Keypoints→Picked KPs 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Element Size at Picked Keypoints 对话框，SIZE 项设为 skind/2，如图 22-91 所示，单击 OK 按钮。



图 22-90 选择坯料外侧关键点对话框

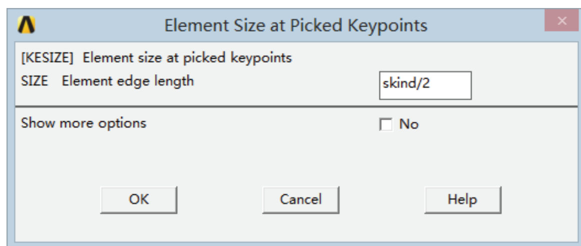


图 22-91 Element Size at Picked Keypoints 对话框

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Keypoints、By Location、X coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“0”，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Keypoints→Picked KPs 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Element Size at Picked Keypoints 对话框，SIZE 项设为 40*skind，单击 OK 按钮。

2）所有模型竖向单元密度设置。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Lines、By Location、Y coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“t/2”，选中 From Full 单选按钮，如图 22-92 所示，单击 OK 按钮。

提示：以线中心点位置作为坐标，选中竖直方向所有线。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Element Size at Picked Lines 对话框，NDIV 项设为 1，单击 OK 按钮。

3）空气和线圈横向单元密度设置。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Lines、By Location、Y coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“0”，选中 From Full 单选按钮，单击 Apply 按钮。

继续在 Select Entities 对话框中依次选中 Lines、By Location、Y coordinates，在 Min,Max 文本框中设为“t”，选中 Also Select 单选按钮，单击 Apply 按钮。

继续在 Select Entities 对话框中依次选中 Lines、By Location、X coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“0,row”，选中 Unselect 单选按钮，如图 22-93 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Element Size at Picked Lines 对话框，SIZE 项设为 0.001，单击 OK 按钮。



图 22-92　竖直方向线选择对话框



图 22-93　反选钢坯横向线对话框

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中模型所有部分。

（8）赋予模型材料和单元属性

1）设置钢坯材料和单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取图 22-89 所示的 1 号面，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项和 TYPE 项分别选中 2 和 1 PLANE53，单击 OK 按钮。

2）设置线圈材料和单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取图 22-89 所示的 3 号面，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项和 TYPE 项分别选中 3 和 2 PLANE53，单击 OK 按钮。

3）设置空气材料和单元属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取图 22-89 所示的 2 号面和 4 号面，单击 OK 按钮，弹出 Area Attributes 对话框，MAT 项和 TYPE 项分别选中 1 和 2 PLANE53，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中模型所有部分。

（9）划分单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Target Surf 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮，所划分的有限元模型如图 22-94 所示。

说明：模型中不同的颜色表示不同的材料。



图 22-94　有限元模型图

（10）施加电磁势边界条件

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“0”，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮。

继续在 Select Entities 对话框，依次选中 Lines、By Location、Y coordinates，在 Min,Max

文本框中输入“t”，选中 Also Select 单选按钮，单击 Apply 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Boundary→VectorPot→On Nodes 菜单命令，弹出 Apply A on Nodes 对话框，Lab 项选中 AZ，VALUE 项设为 0，如图 22-95 所示，单击 OK 按钮。

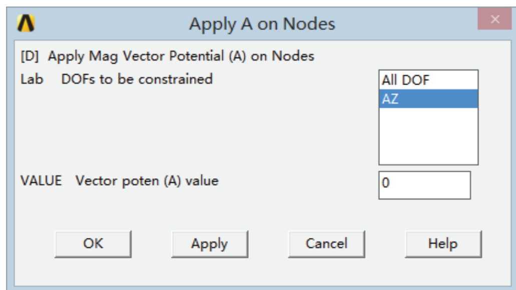


图 22-95 Apply A on Nodes 对话框

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中模型所有部分。

（11）施加电流密度载荷

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Elements、By Attributes，在 Min,Max、Inc 文本框中输入“3”，选中 From Full 单选按钮，如图 22-96 所示，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Magnetic→Excitation→CurrDensity→On Elements 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，单击 Pick All 按钮，拾取以上选中的所有单元，弹出 Apply JS on Elems 对话框，VAL3 项设为 15e6，如图 22-97 所示，单击 OK 按钮。

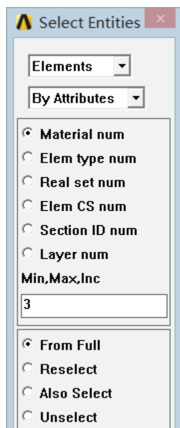


图 22-96 Select Entities 对话框

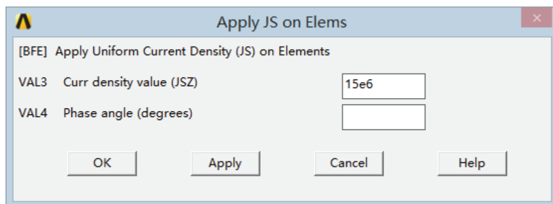


图 22-97 Apply JS on Elems 对话框

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中模型所有部分。

2. 进行热分析的前处理

（1）定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Thermal Solid 和 Quad

4 node 55，Element type reference number 项设为 4，如图 22-98 所示，单击 OK 按钮。

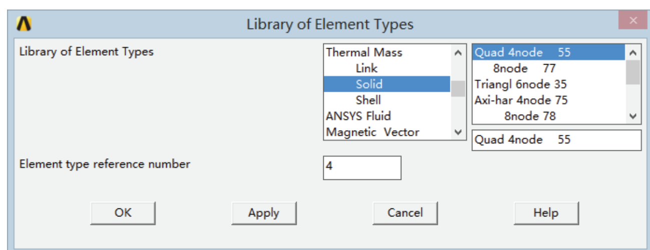


图 22-98 Library of Element Types 对话框

在 Element Types 对话框中，选中 Type 4，单击 Options 按钮，弹出 PLANE55 element type options 对话框，K3 项选择 Axsymmetric，单击 OK 按钮，在 Element Types 对话框中单击 Close 按钮。

（2）复制钢坯矩形

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Copy→Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 1 号面，单击 OK 按钮，弹出 Copy Areas 对话框，ITIME 项设为 2，NOELEM 项选中 Areas only，如图 22-99 所示，单击 OK 按钮。

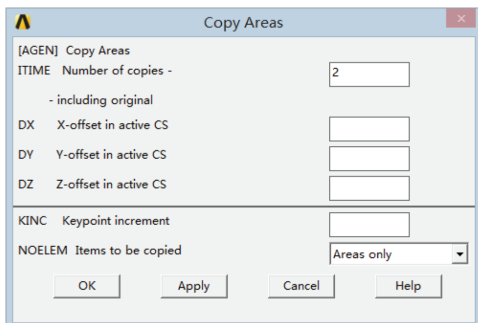


图 22-99 Copy Areas 对话框

（3）赋予钢坯单元和材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Area Attributes 对话框， MAT 项和 TYPE 项分别选中 2 和 4 PLANE55，单击 OK 按钮。

（4）设置热分析单元密度

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Keypoints、By Location、X coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“row”，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Keypoints→Picked KPs 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Element Size at Picked Keypoints 对话框，Size 项设为 skind/2，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Keypoints、By Location、X coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“0”，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Keypoints→Picked KPs 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Element Size at Picked Keypoints 对话框，SIZE 项设为 40*skind，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Lines、By Location、Y coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“t/2”，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Element Size at Picked Lines 对话框，NDIV 项设为 1，单击 OK 按钮。

（5）划分热分析钢坯料单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Target Surf 菜单命令，弹出面拾取对话框，输入“5”按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，划分热分析钢坯料的单元。

（6）施加热辐射边界条件

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Areas、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出面拾取对话框，输入“5”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，选中新建立的 5 号钢坯料面。

执行 Utility Menu→Select→Everything Below→Selected Areas 菜单命令，选中面所附有的所有图元。

继续在 Select Entities 对话框中依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，在 Min,Max 文本框中输入“row”，选中 Reselect 单选按钮，单击 Apply 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Radiation→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，拾取以上选取的所有节点，弹出 Apply RDSF on Nodes 对话框，VALUE 项设为 0.68，VALUE2 项设为 1，如图 22-100 所示，单击 OK 按钮。

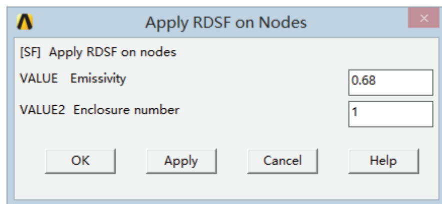


图 22-100 Apply RDSF on Nodes 对话框

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中模型所有部分。

（7）设置辐射求解选项

执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→Solution Opt 菜单命令，弹出 Radiation Solution Options 对话框，STIFF 项设为 5.67e-8，TOFFST 项设为 273，Convergence tolereance 项设为 0.01，在 SPCTEMP/SPCNOD 的 Value 项设为 25，如图 22-101 所示，单击 OK 按钮。

（8）设置辐射系数选项控制

执行 Main Menu→Preprocessor→Radiation Opts→View Factor 菜单命令，弹出 View Factor Options 对话框，V2DOPT 的 Type of geometry 项选中 Axisymmetric，如图 22-102 所示，单击 OK 按钮。

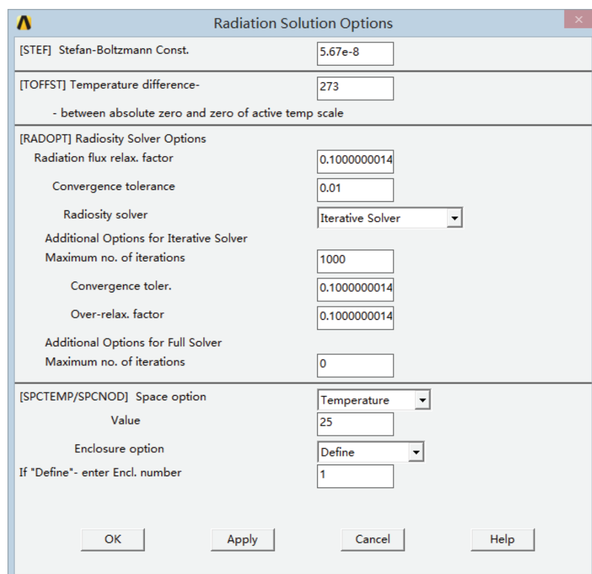


图 22-101 Radiation Solution Options 对话框

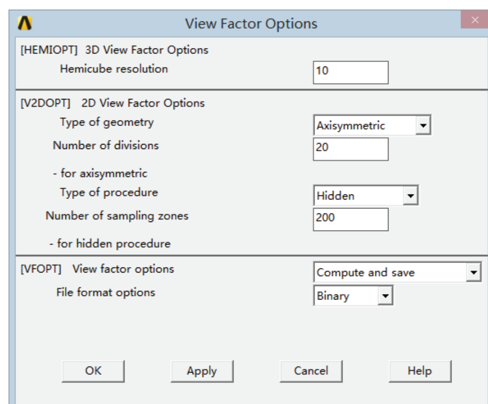


图 22-102 View Factor Options 对话框

3. 设置电磁热耦合场边界及电磁热场的求解设置

（1）设置电磁热耦合边界

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Elements、By Attributes、Materail Num，在 Min,Max 文本框中输入“2”，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮，选中钢坯材料。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Field Volume Intr→On Elements 菜单命令，弹出单元拾取对话框，单击 Pick All 按钮，拾取以上选中的所有单元，弹出 Apply FVIN on Elements 对话框，VAL1 项设为 1，如图 22-103 所示，单击 OK 按钮。

（2）打开多物理场耦合开关

执行 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→Select method 菜单命令，弹出 Mult-field ON/OFF 对话框，选中 ON 单选按钮，如图 22-104 所示，单击 OK 按钮。在随后打开的对话框中，接受默认设置，单击 OK 按钮。

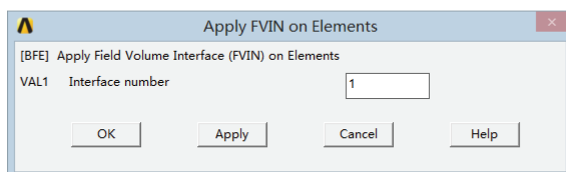


图 22-103 Apply FVIN on Elements 对话框

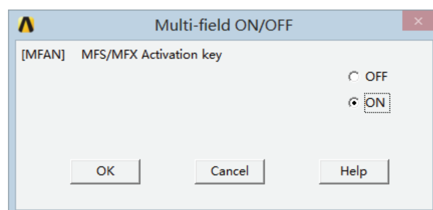


图 22-104 Mult-field ON/OFF 对话框

（3）定义电磁和热场控制文件

1）定义电磁场控制文件。执行 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Define→Define 菜单命令，弹出 MFS Define 对话框，Field number 项设为 1，Element type 项选择 1 PLANE53 和 2 PLANE53，如图 22-105 所示，单击 Apply 按钮。

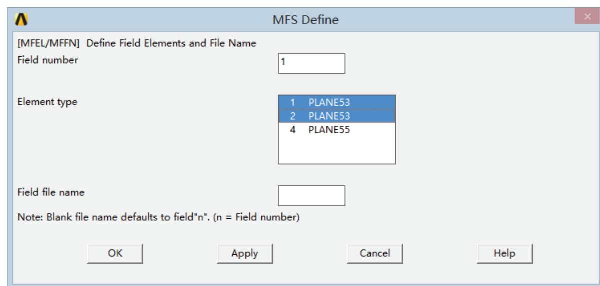


图 22-105　定义电磁场控制文件

2）定义热场控制文件。在 MFS Define 对话框中， Field number 项设为 2， Element type 项选择 4 PLANE55，如图 22-106 所示，单击 OK 按钮。

（4）定义电磁和热场求解顺序

执行 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Setup→Order 菜单命令，弹出 MFS Solution Order Options 对话框，按图 22-107 所示进行设置后，单击 OK 按钮。

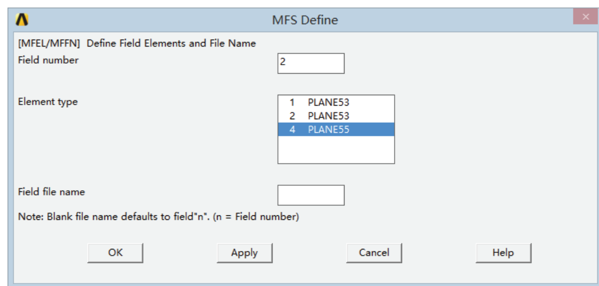


图 22-106　定义热场控制文件

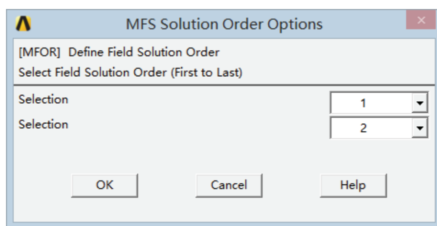


图 22-107　MFS Solution Order Options 对话框

（5）求解时间控制

执行 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Time Ctrl 菜单命令，弹出 MFS Time Control 对话框， MFTI 项设为 ftime，MFDT 项设为 tinc，如图 22-108 所示，单击 OK 按钮。

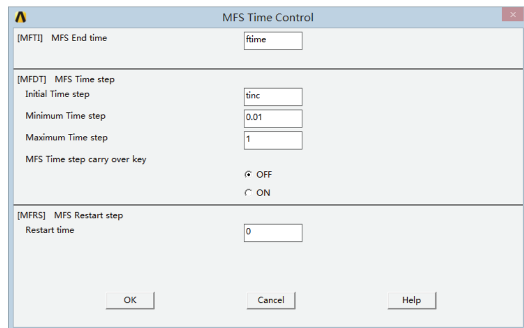


图 22-108　MFS Time Control 对话框

（6）定义收敛误差

执行 Main Menu→Preprocessor→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Stagger→Convergence 菜单命令，弹出 MFS Convergence Options 对话框，选中 ALL，如图 22-109 所示，单击 OK 按钮，弹出 Set Convergence values 对话框，输入“0.001”，如图 22-110 所示，单击 OK 按钮。

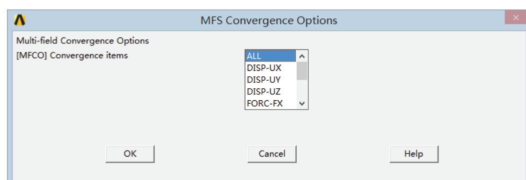


图 22-109 MFS Convergence Options 对话框

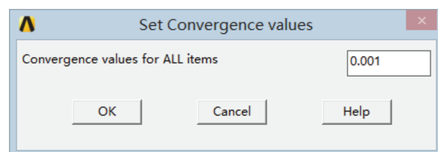


图 22-110 Set Convergence values 对话框

（7）设置电磁场求解类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Harmonic 单选按钮，如图 22-111 所示，单击 OK 按钮。

（8）施加加热频率

执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Time/Frequenc→Freq and Substps 菜单命令，弹出 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框，HARFRQ 项输入“0”和“150000”，如图 22-112 所示，单击 OK 按钮。

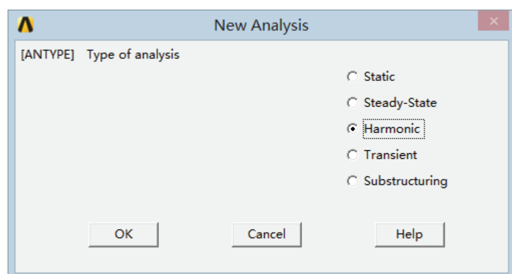


图 22-111 New Analysis 对话框

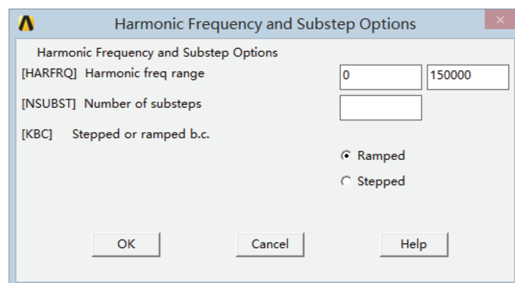


图 22-112 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框

（9）输出控制对话框

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Output Ctrls→DB/Results File 菜单命令，弹出 Controls for Database and Results File Writing 对话框，按图 22-113 进行设置，单击 OK 按钮。

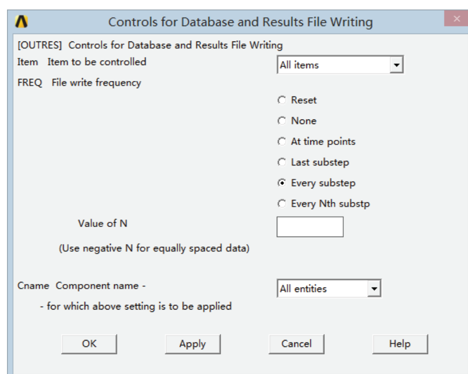


图 22-113 Controls for Database and Results File Writing 对话框

（10）施加温度载荷

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→Uniform Temp 菜单命令，弹出 Uniform Temperature 对话框，输入“100”，单击 OK 按钮。

（11）写电磁场分析文件

执行 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Capture 菜单命令，弹出 MFS Solution option capture 对话框，Field number 项选中 1，如图 22-114 所示，单击 OK 按钮。

（12）清理分析数据

执行 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Clear 菜单命令，弹出 MFS Clear 对话框，Clear Options 项选中 SOLU，如图 22-115 所示，单击 OK 按钮。

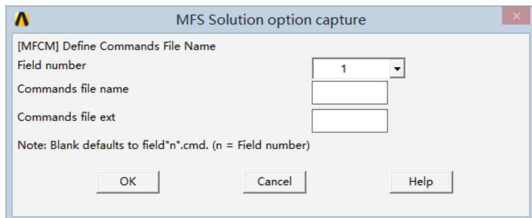


图 22-114　MFS Solution option capture 对话框

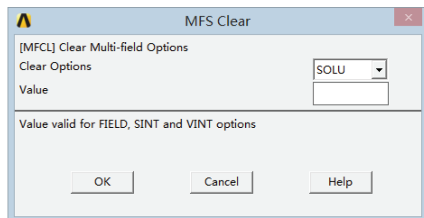


图 22-115　MFS Clear 对话框

（13）设置热分析求解类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient 单选按钮，单击 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，取默认设置，单击 OK 按钮。

（14）设置温度偏移

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Static or Steady Analysis 对话框，TOFFST 项设为 273，其他项保留默认设置。单击 OK 按钮。

（15）施加温度载荷

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→Uniform Temp 菜单命令，弹出 Uniform Temperature 对话框，输入“100”，单击 OK 按钮。

（16）求解设置

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time - Time Step 菜单命令，弹出 Time and Time Step Options 对话框， TIME 项设为 3，DELTIM 项设为 0.01，DELTIM 的 Minimum time step size 和 Maximum time step size 项分别设为 0.005 和 0.01，单击 OK 按钮。

（17）写温度场分析文件

执行 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Capture 菜单命令，弹出 MFS Solution option capture 对话框，Field number 项选中 2，单击 OK 按钮。

（18）电磁场和温度场的耦合关系设置

执行 Main Menu→Solution→Multi-field Set Up→MFS-Single Code→Interface→Volume 菜单命令，弹出 MFS Volume Transfer options 对话框，Transfer variable Label 项选中 HGEN，From Field number 项选中 1，To Field number 项选中 2，Across interface number 项取默认设置 1，如图 22-116 所示，单击 Apply 按钮。

继续在 MFS Volume Transfer options 对话框中，将 Transfer variable Label 项选中 TEMP，From Field number 项选中 2， To Field number 项选中 1，Across interface number 项取默认设置 1，如图 22-117 所示，单击 OK 按钮。



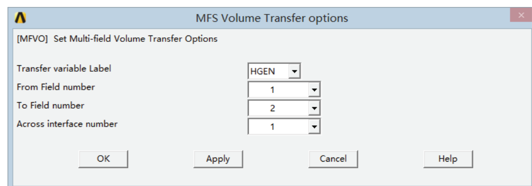


图 22-116 设置电磁场结果传输求解

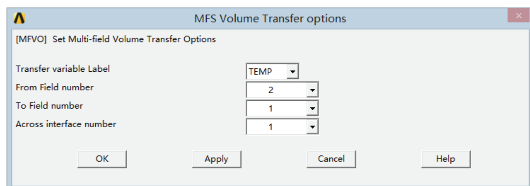


图 22-117 设置温度场结果传输求解

（19）存盘

单击 ANSYS 工具条中的 Save_DB 按钮。

4. 求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算并保存。计算完成后的收敛曲线如图 22-118 所示。

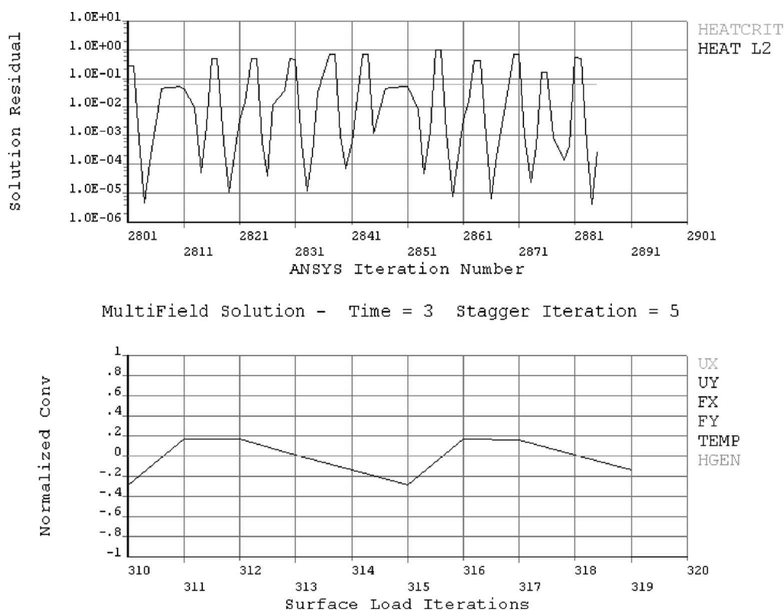


图 22-118 计算收敛曲线

5. 进行后处理

（1）显示坯料中心点和坯料外圆点温度随时间变化曲线图

1）读取温度场计算结果。执行 Main Menu→TimeHistPostpro 菜单命令，弹出结果读取对话框，选中 field2.rth，单击“打开”按钮。在打开过程中，如果出现提示对话框，单击“否”按钮。

提示： 如果误操作了，需要再进行结果读取操作，可以执行 Main Menu→Time History→Variable Viewer 菜单命令，打开 Time History Variable 工具栏，在工具栏执行 File→Open Results 菜单命令，重新选择结果数据。

2）获取坯料中心点和坯料外圆点节点编号。

① 获取坯料中心点编号并赋予 nir。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出

Select Entities 对话框，依次选中 Elements、By Attributes、Elem type num，Min,Max,Inc 项设为 4，选中 From Full 单选按钮，单击 Apply 按钮。

继续依次选中 Nodes、Attached to、Elements，选中 From Full 单选按钮，单击 Apply 按钮。

继续依次选中 Nodes、By Location、X coordinates， Min,Max 项设为 0，选中 Reselect 单选按钮，单击 Apply 按钮。

继续依次选中 Nodes、By Location、Y coordinates，Min,Max 项设为 0，选中 Reselect 单选按钮，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，依次选中 Model data 和 For selected set，如图 22-119 所示，单击 OK 按钮，弹出 Get Data for Selected Entity Set 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 nir， Data to be retrieved 项依次选中 Current node set 和 Highest node num，如图 22-120 所示，单击 OK 按钮。

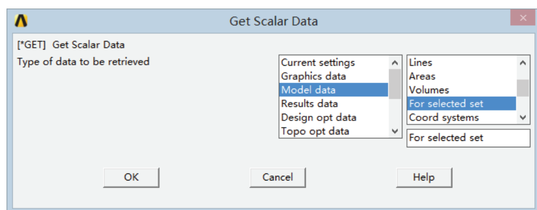


图 22-119 Get Scalar Data 对话框

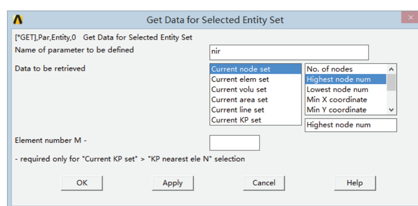


图 22-120 Get Data for Selected Entity Set 对话框

② 获取坯料外圆点编号并赋予 nor。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，在 Select Entities 对话框中，依次选中 Nodes、Attached to、Elements，选中 From Full 单选按钮，单击 Apply 按钮。

继续依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，Min,Max 项设为 row，选中 Reselect 单选按钮，单击 Apply 按钮。

继续依次选中 Nodes、By Location、Y coordinates，Min,Max 项设为 0，选中 Reselect 单选按钮，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，依次选中 Model data、For selected set，单击 OK 按钮，弹出 Get Data for Selected Entity Set 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 nor，Data to be retrieved 项依次选中 Current node set 和 Highest node num，单击 OK 按钮。

3）建立坯料中心点和坯料外圆点变量。执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Variable Viewer 菜单命令，打开 Time History Variable 对话框。

单击+按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，依次选择 Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature，Variable Name 项设为 inner，如图 22-121 所示。单击 OK 按钮，弹出节点拾取对话框，输入“nir”，按〈Enter〉键确认，单击 Apply 按钮，建立变量 inner。

弹出 Add Time-History Variable 对话框，依次选择 Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature，Variable Name 项设为 Outer，单击 OK 按钮，弹出节点拾取对话框，输入“nor”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，建立变量 Outer。

4）编辑时间变量显示方式。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Graphs→Modify Axes

菜单命令，弹出 Axes Modification for Graph Plots 对话框。/AXLAB 项依次设为 TIME 和 TEMPERATURE，其他默认设置，单击 OK 按钮。

5）绘制节点温度随时间的变化曲线。在 Defined Time History Variable 对话框中，按住〈Ctrl〉键，依次选中 inner 和 outer，如图 22-122 所示，单击图标，曲线如图 22-123 所示。

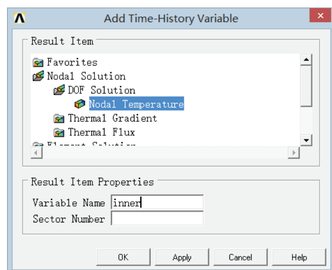


图 22-121　Add Time-History Variable 对话框

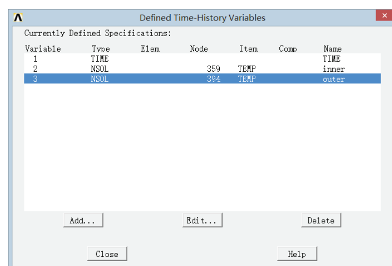


图 22-122　选定变量 outer 和 inner

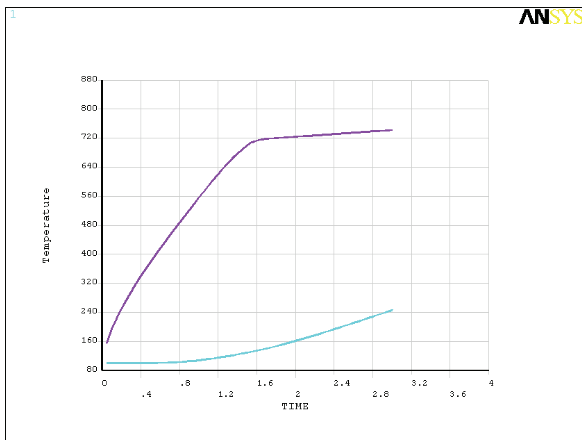


图 22-123　坯料中心点和坯料外圆点温度随时间变化曲线图

（2）显示坯料温度分布云图

1）读取温度场计算结果。执行 Main Menu→General Postproc→Data & File Opts 菜单命令，弹出 Data and File Options 对话框，Data to be read 项选中 All Items，单击 Results file to be read 项后的 ... 按钮，弹出结果选取对话框，选中 field2.rth 打开，如图 22-124 所示，单击 OK 按钮。

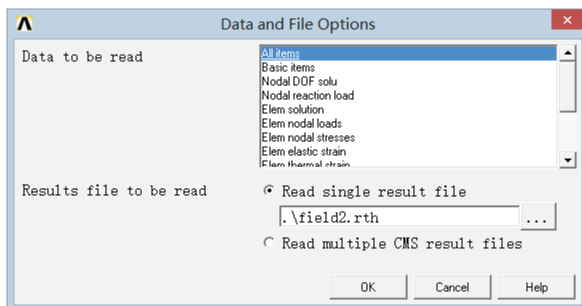


图 22-124　Data and File Options 对话框

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

2）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，在弹出的 Window Options 对话框中，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

3）显示温度分布云图。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Elements、By Attributes、Elem type num，Min,Max,Inc 项设为 4，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，在弹出的 Contour Nodal Solution Data 对话框中，选中 Nodal Solution 和 Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布云图如图 22-125 所示。

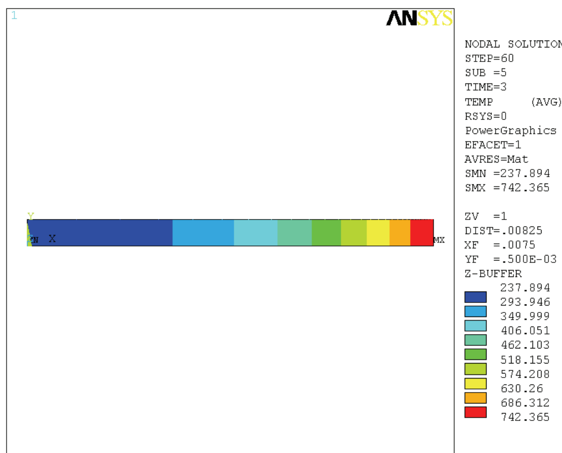


图 22-125 坯料温度分布云图

6. 退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

22.6.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise22-3          /PREP7          !进入前处理器
!================进行电磁分析的前处理======================
et,1,53,,,1                          !选择单元类型并设置为轴对称分析
et,2,53,,,1                          !选择单元类型并设置为轴对称分析
row=.015                             !坯料半径
ric=.0175                            !线圈内半径
roc=.0200                            !线圈外半径
ro=.05                               !空气模拟外半径
t=.001                               !模型轴向厚度
freq=150000                          !加热频率(Hz.)
pi=4*atan(1)                         !pi
cond=.392e7                          !最大热传导系数
```

```
muzero=4e-7*pi                                    !自由空间的磁导率
mur=200                                           !最大相对磁导率
skind=sqrt(1/(pi*freq*cond*muzero*mur))           !集肤效应深度
ftime=3                                           !计算时间
tinc=.05                                          !谐响应分析时间
time=0                                            !初始计算时间
delt=.01                                          !最大时间
emunit,mks                                        !设置电磁场分析单位
mp,murx,1,1                                       !定义空气的相对磁导率
mp,murx,3,1                                       !定义线圈的相对磁导率
mptemp,1,25.5,160,291.5,477.6,635,698             !定义相对磁导率的温度数组
mptemp,7,709,720.3,742,761,1000
mpdata,murx,2,1,200,190,182,161,135,104           !坯料的相对磁导率
mpdata,murx,2,7,84,35,17,1,1
mptemp                                            !清空温度数组
mptemp,1,0,125,250,375,500,625                    !定义电阻率对应的温度数组
mptemp,7,750,875,1000
mpdata,rsvx,2,1,.184e-6,.272e-6,.384e-6,.512e-6,.656e-6,.824e-6
mpdata,rsvx,2,7,1.032e-6,1.152e-6,1.2e-6          !定义坯料的电阻率
mptemp                                            !清空温度数组
mptemp,1,0,730,930,1000                           !定义热传导系数对应的温度数组
mpdata,kxx,2,1,60.64,29.5,28,28                   !定义坯料的热传导系数
mptemp                                            !清空温度数组
mptemp,1,0,27,127,327,527,727                     !定义焓对应的温度数组
mptemp,7,765,765.001,927
mpdata,enth,2,1,0,91609056,453285756,1.2748e9,2.2519e9,3.3396e9
mpdata,enth,2,7,3.548547e9,3.548556e9,4.3520e9    !定义坯料的焓值
mp,emis,2,.68                                     !定义坯料的发射率
rectng,0,row,0,t                                  !建立坯料矩形
rectng,row,ric,0,t                                !建立坯料和线圈间的空气矩形
rectng,ric,roc,0,t                                !建立线圈矩形
rectng,roc,ro,0,t                                 !建立外部空气矩形
aglue,all                                         !进行粘接操作
numcmp,area                                       !压缩面编号
ksel,s,loc,x,row                                  !选定坯料外侧关键点
kesize,all,skind/2                                !设置坯料外层关键点处的单元尺寸
ksel,s,loc,x,0                                    !选定坯料中心位置关键点
kesize,all,40*skind                               !设置坯料中心位置关键点处的单元尺寸
lsel,s,loc,y,t/2                                  !选定竖直方向的所有线
lesize,all,,,1                                    !设置竖直方向线的单元尺寸
allsel,all                                        !选中所有模型
lsel,s,loc,y,0                                    !选定 y=0 位置的线
lsel,a,loc,y,t                                    !选定 y=t 位置的线
lsel,u,loc,x,row/2                                !反选坯料的两水平线
lesize,all,.001                                   !设置以上选定线的单元尺寸
allsel,all                                        !选中所有模型
```

```
asel,s,area,,1                          !选择面 1
aatt,2,1,1                              !设置坯料的材料和单元属性
asel,s,area,,3                          !选择面 3
aatt,3,1,2                              !设置线圈的材料和单元属性
asel,s,area,,2,4,2                      !选择面 2 和面 4
aatt,1,1,2                              !设置空气的材料和单元属性
allsel,all                              !选中所有模型
mshape,0,2d                             !设置网格划分方式
mshk,1
amesh,all                               !划分网格
nsel,s,loc,x                            !选定中心线的所有节点
d,all,az,0                              !施加零磁位
allsel,all                              !选中所有模型
esel,s,mat,,3                           !选中线圈的单元
bfe,all,js,,,,15e6                 !在线圈施加电流密度
allsel,all
!=================进行热场分析的前处理======================
et,4,55,,,1                        !选择单元类型并设置为轴对称分析
agen,2,1,,,,,,,1                   !复制坯料面
aatt,2,1,4                         !设置复制坯料的单元和材料属性
ksel,s,loc,x,row                   !选定坯料外侧关键点
kesize,all,skind/2                 !设置坯料外层关键点处的单元尺寸
ksel,s,loc,x,0                     !选定坯料中心位置关键点
kesize,all,40*skind                !设置坯料中心位置关键点处的单元尺寸
lsel,s,loc,y,t/2                   !选定竖直方向的所有线
lesize,all,,,1                     !设置竖直方向线的单元尺寸
allsel,all                         !选中所有模型
mshape,0,2d                        !设置网格划分方式
mshk,1
amesh,5                            !划分网格
asel,,,,5                          !选定 5 号面
allsel,below,area                  !选定 5 号面附属的所有图元
nsel,r,loc,x,row                   !选定复制坯料外侧的所有节点
sf,all,rdsf,0.68,1                 !施加辐射边界条件
allsel,all                         !选中所有模型
spctemp,1,25                       !设置环境温度值
v2dopt,1
radopt,,0.01
stef,5.67e-8                       !设置斯忒藩-玻尔兹曼常数
!==========设置电磁热耦合场边界及电磁热场的求解设置=============
esel,s,mat,,2                      !选择坯料
bfe,all,fvin,,1                    !设置电磁热耦合边界
finish
/solu
MFAN,ON,MFSC                       !激活多物理场耦合
mfel,1,1,2                         !定义电磁场分析单元
```



```
mfel,2,4                          !定义温度场分析单元
mfor,1,2                          !电磁场和温度场求解顺序
mfti,ftime                        !定义求解时间
mfdt,tinc                         !定义时间求解子步
mfco,all,1e-3                     !定义收敛误差
antyp,harm                        !电磁分析类型选择
HARFRQ,150000,,                   !设置电磁频率
KBC,0                             !斜坡方式加载载荷
outres,all,all                    !定义输出控制
tunif,100                         !设置初始温度值
mfcm,1,                           !写电磁场分析
mfclear,solu                      !清理分析数据
antype,trans                      !定义温度场分析类型
toffst,273                        !设置温度偏移量
tunif,100                         !设置初始温度值
kbc,1                             !阶跃方式加载载荷
trnopt,full
autos,on                          !打开自动时间开关
time,3                            !设置求解时间
deltim,.01,.005,.01,on            !时间步控制
mfcm,2,                           !写温度场分析文件
mfvo,1,1,hgen,2                   !设置电磁场到温度场结果传输
mfvo,1,2,temp,1                   !设置温度场到电磁场结果传输
allsel,all                        !选中所有模型
!==========================求解和存盘============================
solve                             !求解
save                              !存盘
finish
!==========================进行后处理============================
/post26                           !进入时间-历程后处理器
file,field2,rth                   !读取温度场分析结果
esel,s,type,,4                    !选择坯料单元
nsle,s,                           !选择构成坯料单元的节点
nsel,r,loc,x,row                  !选择坯料外圆节点
nsel,r,loc,y,0                    !选择坯料外圆 y=0 的节点
*get,nor,node,,num,max            !获取以上选择节点的编号
nsle,s                            !选择构成坯料单元的节点
nsel,r,loc,x,0                    !选择坯料内圆节点
nsel,r,loc,y,0                    !选择坯料内圆 y=0 的节点
*get,nir,node,,num,max            !获取以上选择节点的编号
allsel
nsol,2,nir,temp,,inner            !定义坯料内圆节点变量 inner
nsol,3,nor,temp,,outer            !定义坯料内圆节点变量 outer
/axlab,y,Temperature              !定义坐标轴 y 轴注释为 Temperature
plvar,2,3                         !显示温度变化曲线
finish
```

```
/post1                    !进入时间历程后处理器
file,field2,rth           !读取温度场分析结果
set,last                  !读取最后一个子步的分析结果
esel,s,type,,4            !选择坯料单元
plns,temp                 !显示温度分布云图
finish
/EXIT,NOSAV               !退出 ANSYS
```



22.7 实例 4——冷却器电热耦合分析

22.7.1 问题描述

本实例应用 ANSYS 的电热耦合分析模块对热电冷却器进行分析，该冷却器有两个半导体以及相互之间的铜盖板连接而成。一块半导体为 N 型，另一块半导体为 P 型，冷却器冷端温度为 Tc，热端温度为 Th，在热端通有电流强度为 I 的电流。冷却器几何形状如图 22-126 所示，图中各参数值列于表 22-13，材料性能参数见表 22-14。

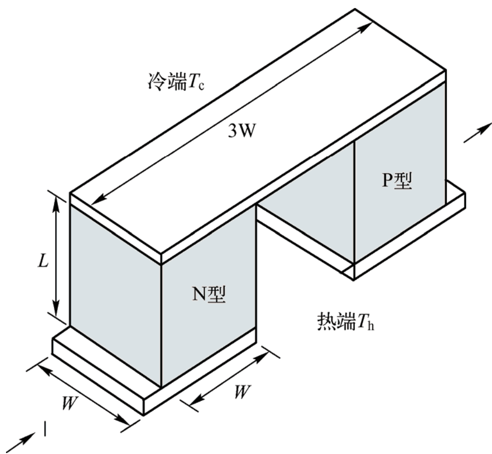


图 22-126 热电冷却器几何模型

表 22-13 各参数值表

L/mm	W/mm	H_s/mm	T_c/℃	T_h/℃	I/A
10	10	1	0	54	28.7

表 22-14 材料性能参数值

材料名称	电阻系数/（Ω•m）	热传导系数/（W/(m•℃)）	赛贝克系数/（V/℃）
N 型半导体	1.05×10^{-5}	1.3	-165×10^{-6}
P 型半导体	0.98×10^{-5}	1.2	210×10^{-6}
铜盖板	1.7×10^{-8}	400	

22.7.2 问题分析

本实例属于稳态电热耦合分析，选用电热耦合分析单元 SOLID226 进行电热耦合分析。分析时，温度采用℃，其他采用国际单位制。

22.7.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise22-4”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Thermal-Electric 和 Brick20node 226，如图 22-127 所示，单击 OK 按钮。

在 Element Types 对话框中，选中 Type 1 SOLID226，单击 Options 按钮，弹出 SOLIDE226 element type options 对话框，K1 项选择 Thermoelectric，如图 22-128 所示，单击 OK 按钮。在 Element Types 对话框中单击 Close 按钮。

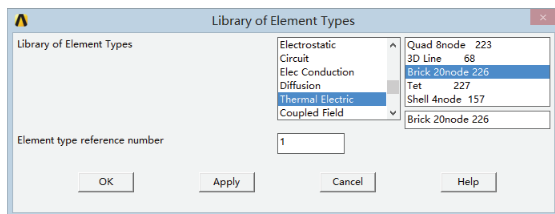


图 22-127　SOLID226 选取对话框

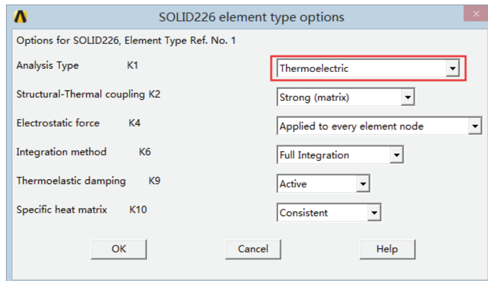


图 22-128　SOLIDE226 element type options 对话框

3．定义材料属性

（1）定义 N 型半导体的材料属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。

1）定义 N 型半导体的电阻系数。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Electromagnetics→Resistivity→Constant 菜单命令，弹出电阻系数定义对话框，RSVX 项设为 1.05e-5，如图 22-129 所示，单击 OK 按钮。

2）定义 N 型半导体的导热系数。继续执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，弹出导热系数定义对话框，KXX 项设为 1.3，单击 OK 按钮。

3）定义 N 型半导体的赛贝克系数。继续执行 Material Models Available→Thermoelectricity→Isotropic 菜单命令，弹出赛贝克系数定义对话框，SBKX 项设为-165e-6，如图 22-130 所示，单击 OK 按钮。

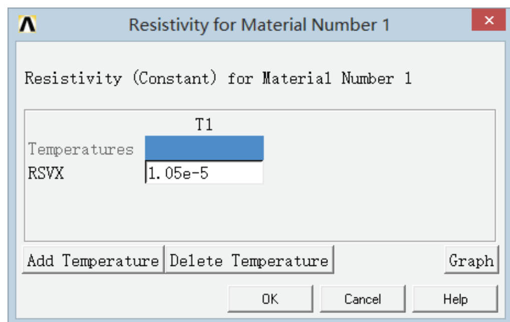


图 22-129 N 型半导体电阻系数定义对话框

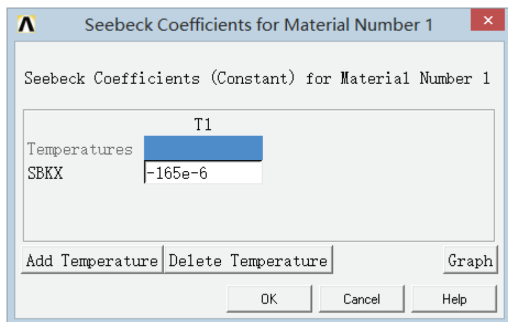


图 22-130 N 型半导体赛贝克系数定义对话框

（2）定义 P 型半导体的材料属性。在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认 ID 为 2,，单击 OK 按钮。

1）定义 P 型半导体的电阻系数。选中 Material Model Number 2，执行 Material Models Available→Electromagnetics→Resistivity→Constant 菜单命令，弹出电阻系数定义对话框，RSVX 项设为 0.98e-5，单击 OK 按钮。

2）定义 P 型半导体的导热系数。继续执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，弹出导热系数定义对话框，KXX 项设为 1.2，单击 OK 按钮。

3）定义 P 型半导体的赛贝克系数。继续执行 Material Models Available→Thermoelectricity→Isotropic 菜单命令，弹出赛贝克系数定义对话框，SBKX 项设为 210e-6，单击 OK 按钮。

（3）定义铜板材料属性。在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认 ID 为 3，单击 OK 按钮。

1）定义铜板的电阻系数。选中 Material Model Number 3，执行 Material Models Available→Electromagnetics→Resistivity→Constant 菜单命令，弹出电阻系数定义对话框，RSVX 项设为 1.7e-8，单击 OK 按钮。

2）定义铜板的导热系数。继续执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，弹出导热系数定义对话框，KXX 项设为 400，单击 OK 按钮。

4．定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

L=1e-2

W=1e-2

HS=0.1e-2

5．建立几何模型

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimensions 菜单命令，弹出 Create Block by Dimensions 对话框，X1、X2、Y1、Y2、Z1、Z2 项分别输入 W/2、3*W/2、0、W、0、L，如图 22-131 所示，单击 Apply 按钮，建立 N 型半导体模型。

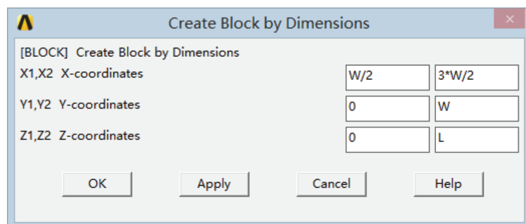


图 22-131 Create Block by Dimensions 对话框

继续在 Create Block by Dimensions 对话框中将 X1、X2、Y1、Y2、Z1、Z2 项分别设为-3*W/2、-W/2、0、W、0、L，单击 Apply 按钮，建立 P 型半导体模型。

继续在 Create Block by Dimensions 对话框中将 X1、X2、Y1、Y2、Z1、Z2 项分别设为-3*W/2、3*W/2、0、W、L、L+HS，单击 Apply 按钮，建立两半导体之间的连接铜板。

继续在 Create Block by Dimensions 对话框中将 X1、X2、Y1、Y2、Z1、Z2 项分别设为-1.7*W、-W/2、0、W、-HS、0，单击 Apply 按钮，建立 P 型半导体底部的连接铜板。

继续在 Create Block by Dimensions 对话框中将 X1、X2、Y1、Y2、Z1、Z2 项分别设为 W/2、1.7*W、0、W、-HS、0，单击 OK 按钮，建立 N 型半导体底部的连接铜板。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Operate→Booleans→Glue→Volumes 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮选中所有体，进行粘结操作。

6. 赋予模型材料和单元属性

（1）定义 N 型半导体的材料属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes 菜单命令，弹出体选取对话框，选中 List of Items，输入“1”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，弹出 Volume Attributes 对话框，MAT 项选中 1，TYPE 项选中 1 SOLID226，单击 OK 按钮。

（2）定义 P 型半导体的材料属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes 菜单命令，弹出体选取对话框，选中 List of Items，输入“2”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，弹出 Volume Attributes 对话框，MAT 项选中 2，TYPE 项选中 1 SOLID226，单击 OK 按钮。

（3）定义铜板的材料属性。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Volumes 菜单命令，弹出体选取对话框，选中 Min,Max,Inc，输入“6,8,1”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，弹出 Volume Attributes 对话框，MAT 项选中 3，TYPE 项选中 1 SOLID226，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，NODE 项选中 Material numbers，/NUM 项选中 Colors only，单击 OK 按钮，所得的几何模型如图 22-132 所示。

7. 划分单元

（1）设置网格密度。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，在弹出的 Global Element Sizes 对话框中，SIZE 项设为 W/5，单击 OK 按钮。

（2）划分单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume Sweep→

Sweep 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮拾取所有模型，得有限元模型如图 22-133 所示。

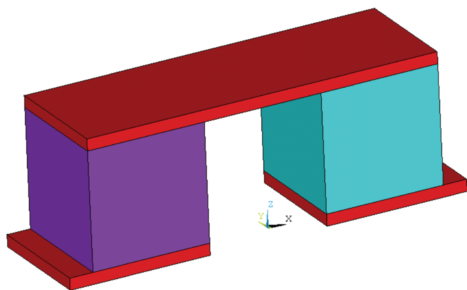


图 22-132 几何模型图

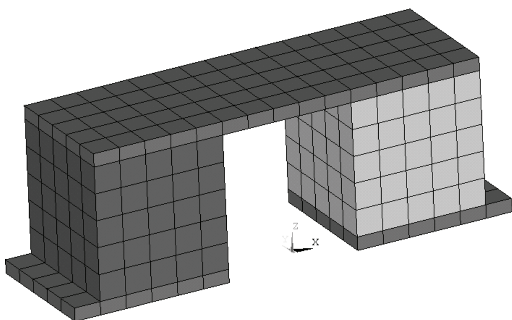


图 22-133 有限元模型图

8．施加边界约束条件

（1）设置冷面温度边界约束自由度。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、Z coordinates，Min,Max 项设为 L+HS，选中 From Full 单选按钮，如图 22-134 所示，单击 OK 按钮，选中冷面的所有节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Couple DOFs 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Define Coupled DOFs 对话框，NSET 项设为 1，Lab 项选中 TEMP，如图 22-135 所示，单击 OK 按钮。

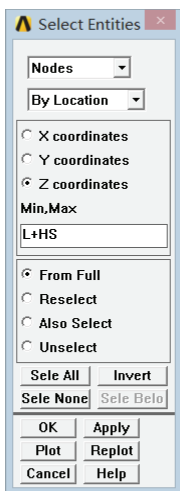
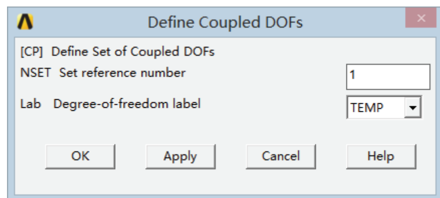


图 22-134 Select Entities 对话框



22-135 Define Coupled DOFs 对话框

（2）获取冷端主节点号。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，依次选中 Model data 和 Nodes，如图 22-136 所示，单击 OK 按钮。弹出 Get Nodal Data 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 NC，Node number N 项设为 0，选中 Next higher node，如图 22-137 所示，单击 OK 按钮。

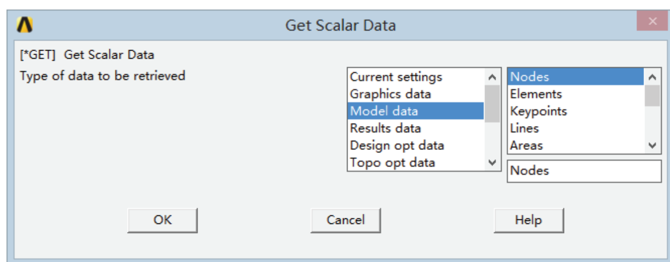


图 22-136 Get Scalar Data 对话框

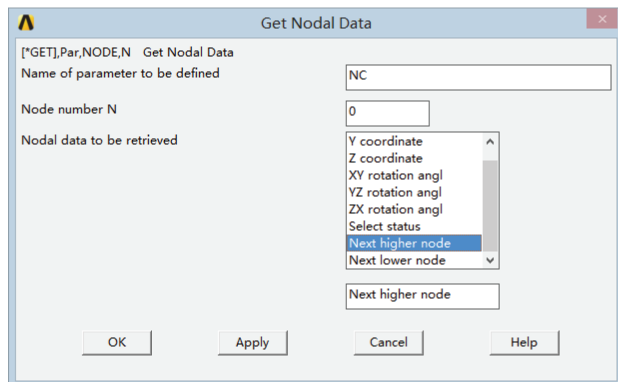


图 22-137 Get Nodal Data 对话框

提示：获取所选中的节点中编号最小的节点号。在图 22-137 所示等温度耦合约束的定义过程中，将所有其他节点与最小编号节点进行等温度耦合，最小编号节点即为主节点。

（3）施加热面温度载荷。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、Z coordinates，Min,Max,Inc 项设为-HS，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮，选中热面的所有节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply TEMP on Nodes 对话框，选中 TEMP，VALUE 项设为 54，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（4）施加冷面主节点温度载荷。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“NC”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，弹出 Apply TEMP on Nodes 对话框，选中 TEMP，VALUE 项设为 0，单击 OK 按钮。

（5）定义零电位载荷。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，Min,Max,Inc 项设为-1.7*W，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮，选中 P 型半导体铜板的所有节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Electric→Boundary→Voltage→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply VOLT on nodes 对话框，VALUE 项设为 0，如图 22-138 所示，单击 OK 按钮。

（6）定义 N 型半导体铜板端部等电位耦合约束。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜

单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，Min,Max,Inc 项设为 1.7*W，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮，选中 P 型半导体铜板的所有节点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Coupling / Ceqn→Couple DOFs 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Define Coupled DOFs 对话框，NSET 项设为 2，Lab 项选中 VOLT，单击 OK 按钮。

（7）获取 N 型半导体铜板端部主节点号。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，依次选中 Model data 和 Nodes，单击 OK 按钮。弹出 Get Nodal Data 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 NI，Node number N 项设为 0，选中 Next higher node，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（8）定义 N 型半导体铜板端部电流值。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Electric→Excitation→Current→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“NI”，单击 OK 按钮，弹出 Apply AMPS on nodes 对话框，VALUE 项设为 28.7，如图 22-139 所示，单击 OK 按钮。

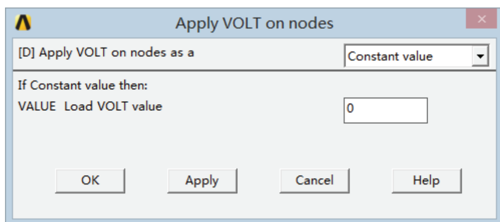


图 22-138 Apply VOLT on Nodes 对话框

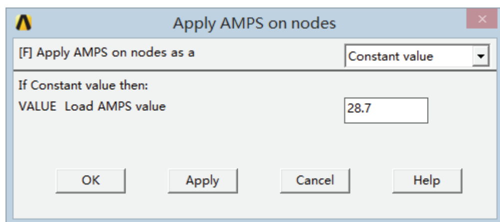


图 22-139 Apply AMPS on nodes 对话框

9．设置求解选项

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Steady-State，单击 OK 按钮。

10．温度偏移量设置

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令，弹出 Full Transient Analysis 对话框，TOFFST 项设为 273，单击 OK 按钮。

11．求解并存盘

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分。单击 ANSYS 工具条中的 Save_DB 按钮。

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算和保存。

12．提取冷面热流量

在输入窗口输入“*get,Qc,node,nc,rf,heat“，如图 22-140 所示，按〈Enter〉键确认，提取冷面主节点的热流量，即整个冷面的热流量值。



图 22-140 命令方式提取冷面热流量示意图

再在输入窗口依次输入“P=volt(ni)*28.7”“beta=%Qc/P%”，即可得该电热耦合分析过程中的焦耳热 P 以及冷面散热量在总能量中所占的比例 beta。

13．删除温度载荷并施加热流量值

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Delete→Thermal→Temperature→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“NC”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，删除冷面的温度载荷值。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Heat Flow→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，输入“NC”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，弹出 Apply Heat on Nodes 对话框，选中 HEAT，VALUE 项设为 Qc，如图 22-141 所示，单击 OK 按钮。

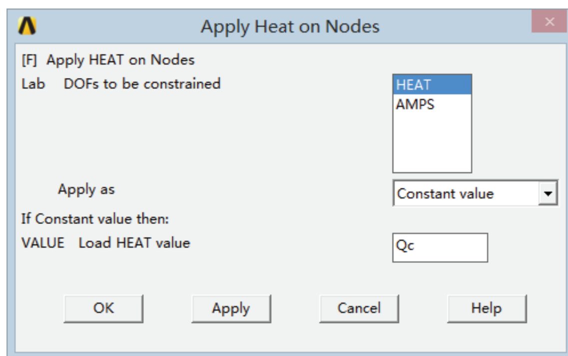


图 22-141 Apply Heat on Nodes 对话框

14．存盘

执行 Utility Menu→Select→Select Everything 菜单命令，选中模型中的所有部分，单击 ANSYS 工具条中的 Save_DB 按钮。

15．求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，进行计算和保存。

16．显示温度分布云图

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布如图 22-142 所示。

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Electric potential 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布如图 22-143 所示。

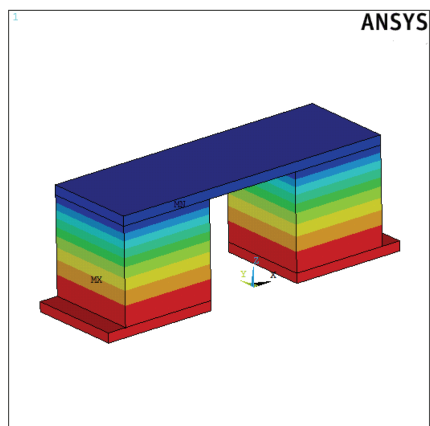


图 22-142 温度场分布云图

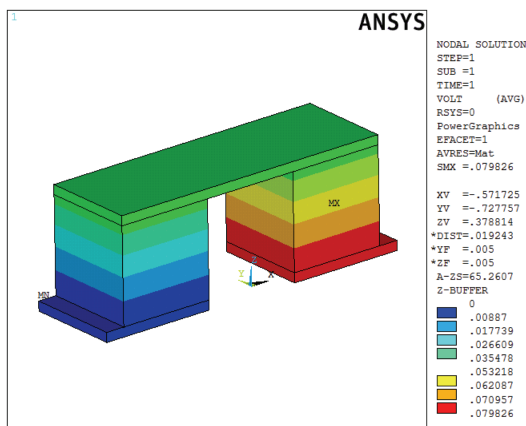


图 22-143 电压分布云图

17．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

22.7.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise22-4
/PREP7                          !进入前处理器
et,1,226,110                    !选择单元类型并设置为轴对称分析
mp,rsvx,1,1.05e-5               !定义 N 型半导体电阻率
mp,kxx,1,1.3                    !定义 N 型半导体导热系数
mp,sbkx,1,-165e-6               !定义 N 型半导体赛贝克系数
mp,rsvx,2,0.98e-5               !定义 P 型半导体电阻率
mp,kxx,2,1.2                    !定义 P 型半导体导热系数
mp,sbkx,2,210e-6                !定义 P 型半导体赛贝克系数
mp,rsvx,3,1.7e-8                !定义铜板电阻率
mp,kxx,3,400                    !定义铜板导热系数
L=1e-2
W=1e-2
HS=0.1e-2                       !定义参数
block,W/2,3*W/2,,W,,L
block,-3*W/2,-W/2,,W,,L
block,-3*W/2,3*W/2,,W,L,L+HS
block,-1.7*W,-W/2,,W,-HS,0
block,W/2,1.7*W,,W,-HS,0        !建立几何模型
vglue,all                       !进行粘接操作
vsel,s,,,1                      !选定 1 号体
vatt,1,,1                       !定义 N 型半导体材料属性
vsel,s,,,2                      !选定 2 号体
vatt,2,,1                       !定义 P 型半导体材料属性
allsel,all                      !选中所有模型
vsel,u,mat,,1,2                 !反选 N 型和 P 型半导体材料
```

```
vatt,3,,1                          !定义铜板材料属性
allsel,all                         !选中所有模型
esize,W/5                          !定义单元尺寸
vsweep,all                         !进行网格划分
nsel,s,loc,z,L+HS                  !选中冷面所有节点
cp,1,temp,all                      !对冷面节点定义等温度约束
nc=ndnext(0)                       !获取冷面主节点号并赋予 nc
nsel,s,loc,z,-HS                   !选中热面所有节点
d,all,temp,54                      !定义热面温度载荷
nsel,s,loc,x,-1.7*W                !选中 P 型半导体铜板端面所有节点
d,all,volt,0                       !对 P 型半导体铜板端面节点施加零电位载荷
nsel,s,loc,x,1.7*W                 !选中 N 型半导体铜板端面节点
cp,2,volt,all                      !对 N 型半导体铜板端面节点施加等电位约束
ni=ndnext(0)                       !获取 N 型半导体铜板端面的主节点号并赋予 ni
allsel,all                         !选中所有模型
finish
/SOLU                              !进入求解器
antype,static                      !设置为稳态求解
toffst,273                         !设置温度偏移量
d,nc,temp,0                        !定义冷面主节点温度值
f,ni,amps,28.7                     !定义 N 型半导体铜板端面的主节点的电流值
solve                              !进行求解
finish
/POST1                             !进入通用后处理器
*get,Qc,node,nc,rf,heat            !获取冷面的热流量
P=volt(ni)*28.7                    !计算焦耳热
beta = %Qc/P%                      !获取冷面散热量在总能量中所占的比例 beta
/SOLU                              !进入求解器
ddele,nc,temp                      !删除所有温度载荷
f,nc,heat,Qc                       !在冷面主节点施加热流量值
solve                              !进行求解
finish
/POST1                             !进入通用后处理器
plnsol,temp                        !显示温度分布云图
plnsol,volt,,0                     !显示电势分布云图
finish
/EXIT,NOSAV                        !退出 ANSYS
```

22.8 本章小结

本章简单介绍了耦合场分析的概念和分类，并详细介绍了耦合场分析的直接方法和间接方法的基本过程和操作步骤。本章还提供了 4 个耦合分析的实例，包括直接热应力耦合分析、物理环境法进行间接热应力耦合分析、电热耦合分析以及电热耦合分析，在实例中穿插讲解接触的使用和定义，帮助读者掌握 ANSYS 热应力耦合分析的操作步骤以及接触的应用方法和技巧。



第 23 章　自适应网格划分技术

ANSYS 软件提供了自适应网格划分技术，在一些工程分析中经常用到该技术，为解决实际问题提供了便利。本章对自适应网格划分技术在 ANSYS 中的计算原理、应用前提以及使用方法进行了详细介绍，并通过工程实例讲述使用自适应网格划分技术的基本步骤和技巧。

学习目标：

（1）了解 ANSYS 自适应网格划分技术的定义、应用条件和使用方法;

（2）掌握实例学习 ANSYS 中自适应网格划分技术的操作步骤。

23.1　自适应网格划分技术简介

当面对一个具体需要分析的问题时，往往无法确定什么样的网格密度能够得到满足需要的结果。基于这一点考虑，ANSYS 程序提供了自适应网格划分技术，在计算过程中判断网格的疏密程度是否足够，进而进行相应的调整以达到精确的计算。

23.1.1　自适应网格划分技术的定义

ANSYS 程序提供了特定的技术以自动估计特定分析类型中网格划分带来的误差。通过这种误差估计，可以确定网格是否足够细。如果不够细的话，程序将自动细化网格以减少误差。这一自动估计网格划分误差并细化网格的过程就叫作自适应网格划分。

通过一系列的求解过程使得误差低于用户指定的数值（或直到用户指定的最大求解次数)。这种自适应网格划分技术是估算热分析计算误差和网格划分密度合理评定的一种方法。

23.1.2　自适应网格划分的先决条件

ANSYS 软件中包含一个预先写好的宏——ADAPT.MAC，用于完成自适应网格划分的功能。要使用这个宏完成自适应网格划分，用户的模型必须满足以下特定的条件：

（1）标准的 ADAPT 过程只适用于单次求解的线性静力结构分析和线性稳态热分析。

（2）模型最好使用一种材料类型，因为误差计算是根据平均节点应力进行的，在不同材料过渡位置往往不能进行计算，而且单元的能量误差是受材料弹性模量影响的。因此，在两个相邻单元应力连续的情况下，其能量误差也可能由于材料特性不同而不一样。在模型中同样应该避免壳厚突变，这也可能造成在应力平均时发生问题。

（3）模型必须使用支持误差计算的单元类型。

（4）模型必须是可以划分网格的，即模型中不能有引起网格划分出错的部分。

在一些情况下，不满足要求的模型可以用修正的过程完成自适应网格划分，后文将就该问题进行讨论。

23.1.3 自适应网格划分技术的应用方法

1．基本过程

进行自适应网格划分的基本过程包括如下步骤：

（1）和其他线性静力分析或稳态热分析一样，先进入前处理器，指定单元类型、实参数和材料特性。

（2）用实体建模过程建立模型，用可以划分网格的面或体建模。用户不需要指定单元大小，也不用划分网格，ADAPT 宏会自动划分网格。如果要同时划分面和体网格，须生成 ADAPTMSH.MAC 用户子程序（见后文）。

（3）在 PREP7 或 SOLUTION 中指定分析类型、分析选项、载荷和载荷步选项。在一个载荷步中仅施加实体模型载荷和惯性载荷（加速度、角加速度和角速度）。通过 ADAPTBC.MAC 用户子程序，可以施加有限单元载荷、固连和约束方程。通过 ADAPTSOL.MAC 用户子程序，可以加入多个载荷步。这些子程序在后面还要讨论。

（4）如果在 PREP7 中，退出前处理器[FINISH]（可以在 SOLUTION 或在初始状态下激活 ADAPT 宏）。

（5）激活自适应求解。执行 Main Menu→Solution→Solve→Adaptive Mesh 菜单命令，弹出图 23-1 所示的 Adaptive Meshing and Solution 对话框，或者使用命令 ADAPT 来实现。

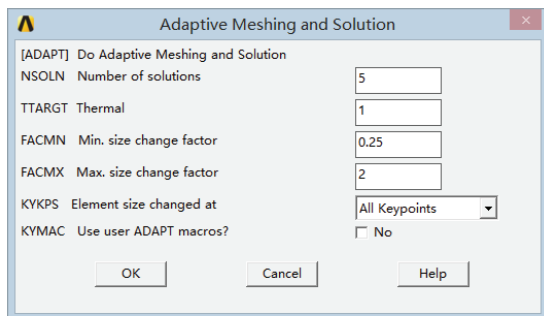


图 23-1　Adaptive Meshing and Solution 对话框

注意：可以在热分析或结构分析中使用 ADAPT 宏，但不能在一次自适应分析中同时进行这两种不同类型的计算。在自适应网格划分的迭代过程中，单元的大小将作调整（在 FACMN 和 FACMX 指定的范围内）以减小或增加单元能量误差，直到误差满足指定的数值（或指定的最大求解次数）为止。

（6）当自适应网格计算收敛时，程序自动将单元形状检查打开[SHPP,ON]，然后返回 SOLUTION 或初始状态，这取决于激活 ADAPT 的状态。接下来可以进入 POST1，用标准操作进行后处理。

2．修改基本过程

（1）选择自适应性：如果用户清楚某个部分网格划分的误差相对影响较小时（如应力水平较低且变化较小），可以将这些区域从自适应网格划分中排除以加快分析速度。

同样，用户也许想将接近应力奇异点的部分（如集中载荷）排除掉，选择逻辑操作可以解决这类问题，如图 23-2 所示。

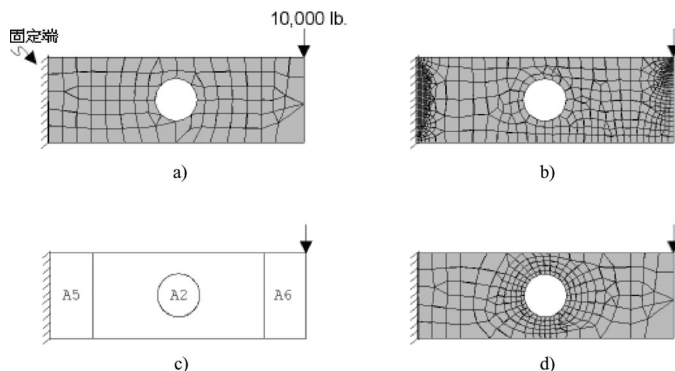


图 23-2 选择自适应能改进有应力集中的模型

a）初始网格 b）自适应计算机所划分的网格：集中力和约束部位网格加密
c）除区域 5 和区域 6 外进行自适应网格划分 d）在 c 图情况下的自适应网格

注意：

如果选择了一个关键点集，ADAPT 宏仍将包含所有的关键点，选择的和未选择的关键点附近都作网格改动，除非将 ADAPT 命令中的 KYKPS 设为 1。

如果用户选择了一个面或体集，ADAPT 宏将只在选择的区域调整网格大小。此时必须在激活 ADAPT 宏之前在 PREP7 中对整个模型进行网格划分。

（2）定制 ADAPT 宏：标准的 ADAPT 宏并不能满足特定的分析需要。例如，用户可能想同时对面和体进行网格划分，这在标准宏当中是不可能实现的。对于这种或其他一些类似情况，可以对 ADAPT 宏进行修改使之适用于特定的分析。

ANSYS 程序用宏这种方式完成自适应网格划分，本身就使得用户可以对其进行相应的修改以适应不同的要求。方便的是，用户不用总是通过修改 ADAPT 代码的方式来定制宏。宏的 3 个部分可以使用用户子程序的方法来修改，这个方法将 ADAPT 宏和用户文件分开，用户可以生成子程序由 ADAPT 宏来调用。这 3 个部分网格划分命令序列、边界条件命令序列和求解命令序列，相应的用户子程序名为 ADAPTMSH.MAC、ADAPTBC.MAC 和 ADAPTSOL.MAC。下面详细叙述这 3 个子程序的功能。

1）生成用户网格划分子程序（ADAPTMSH.MAC）。

默认情况下，如果模型中包含一个或多个体，ADAPT 宏将只对体划分网格而不对面进行划分。如果当前选择集中没有体，宏才对面进行划分。如果要同时对面和体进行划分的话，就要生成用户子程序 ADAPTMSH.MAC 来提供相应的操作。在重新划分网格之前要清楚所有这些实体中划分过网格的实体。子程序大致如下：

```
C*** Subroutine ADATMSH.MAC-Your name-Job Name-Data Created
TYPE,1              !指定划分网格的单元类型属性
ACLEAR,3,5,2        !清除本程序中要重新划分网格的面和体的网格
VCLEAR,ALL
AMESH,3,5,2         !对面 3 和 5 划分网格（ADAPT 不对其他面划分网格）
TYPE,2              !改变单元类型，划分体
VMESH,ALL           !对所有体划分网格
```

可在 ANSYS 帮助文件中查阅 TYPE、ACLEAR、VCLEAR,AMESH 和 VMESH 命令以获得更详细的解释。

建议将 C***行包含在文件中以区别不同的宏。这一行将在任务的输出中出现，以确认 ADAPT 宏正确地调用了用户子程序。

2）生成用户边界条件子程序（ADAPTBC.MAC）。

ADAPT 宏在每次求解循环时都要清除并重新划分网格，因此模型的节点和单元也要不断改变。这就使得所有的有限单元载荷、自由度固连、约束方程等施加在节点和单元的边界条件都不能使用。如果要包含这些有限单元约束，就要使用用户子程序 ADAPTBC.MAC。

在这个子程序中，可以选择节点然后定义有限单元载荷、自由度固连和约束方程。下面是一个 ADAPTBC.MAC 的例子：

```
C*** Subroutine ADAPTBC.MAC-Your name-Hob Name-Data Created
NSEL,S,LOC,X,0          !选择 X 坐标为 0 的节点
D,ALL,UX,0              !令选择的所有节点 UX 为 0
NSEL,S,LOC,Y,0          !选择 Y 坐标为 0 的节点
D,ALL,UX,0              !令选择的所有节点 UY 为 0
NSEL,ALL                !选择所有节点
```

3）生成用户求解子程序（ADAPTSOL.MAC）。ADAPT 宏中的求解命令序列很简单：

```
/SOLU
SOLVE
FINISH
```

这个默认的命令序列只能求解单个载荷步。用户可以将其他的命令序列加入用户子程序 ADAPTSOL.MAC 中。

（3）关于用户子程序的一些其他说明。

用户可以像生成其他文件一样生成这些子程序。就是说，可以用 APDL 语言的*CREATE 命令（Utility Menu→Macro→Create Macro）和 APDL 的*END 命令，也可以用外部的文件编辑器。

当 ADAPT 宏调用这些子程序时，软件先搜索 ANSYS 根目录，再搜索用户根目录，最后是当前目录。因此，要确保其他目录中不包括与所用文件同名的文件。解释行（C***）会在输出文件中出现，可以通过它来检查是否使用了正确的文件。

另外，通过在运行 ADAPT 宏之前用/PSEARCH,OFF（Utility Menu→Macro→Macro Search Path）指定软件只搜索 ANSYS 根目录和用户当前目录，可以从某种程度上减少文件混用的可能。不管这些子程序在什么位置，它们都能被找到，除非将 ADAPT 命令的 KYMAC 选项设为 1。

23.1.4 定制 ADAPT 宏（UADAPT.MAC）

有些情况下，用户需要修改 ADAPT 宏，但不能通过单独的用户子程序的方式，那么就需要直接修改 ADAPT 宏的主体。但是，因为某些原因，我们不推荐直接对 ADAPT 宏进行修改。例如，如果别的用户和你同时使用一个软件，那么在调用 ADAPT 宏时将影响使用。

因此，在 ANSYS 安装中支持一个宏的复制文件 UADAPT.MAC，便于用户修改。

如果对 UADAPT.MAC 文件进行了修改，我们建议对修改后的文件取一个新的文件名，然后在调用时输入这个文件名。要知道的是，如果新文件名是“unknown command”，ANSYS 将搜索上级目录，然后是登录目录，最后是工作目录，直到找到这个宏为止。

如果修改的宏只能为一个用户使用，那么存储的位置应在用户登录目录的层次之下（不能等于或高于这个目录层次）。这样，存储的低层次的文件可以通过*USE 命令（Utility Menu→macro→Execute Data Block）来调用。

23.1.5 自适应网格划分的一些说明

下面的建议可能有助于自适应网格划分的使用。

（1）不需要指定初始网格大小，但指定大小可能有利于自适应收敛。

1）设置关键点网格尺寸。

如果用户指定了关键点网格大小，ADAPT 宏在第一次循环时使用这个值，然后在随后的循环中进行调整。用下列命令指定单元大小。

GUI 操作：执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Keypoints→All KPs 菜单命令，或者 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Keypoints→Picked KPs 菜单命令。

命令：KESIZE。

2）设置线分段数或大小比例。

如果定义了线分段数或大小比例，ADAPT 宏将在每次循环中都使用这个数值而不作改变。如果没有定义任何形式的网格份数，在初始网格划分时将使用默认的网格大小，可以参见 SMRTSIZE 和 DESIZE 命令。用下列方法指定线分段数或大小比例。

GUI 操作：执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Lines→All Lines 菜单命令，或者 Main Menu→Preprocessor→Meshing>Size Cntrls→ManualSize→Lines→Picked Lines 菜单命令。

命令：LESIZE

（2）映射网格划分适用于 2D 实体和 3D 壳单元，但面的映射划分效果不明显。

（3）映射网格划分适用于 3D 实体，对体进行映射划分比自由划分效果要好得多。

（4）总体上说，在自适应网格中有中间节点的单元比线性单元要好。

（5）不要用集中载荷或尖角等引起奇异性的结构，因为此时 ADAPT 在这些奇异点处的能量值将不收敛。如果模型中有集中载荷，与将其施加在一个小面上的压力等效。也可以将奇异部分排除在自适应网格划分之外。

（6）在许多情况下，用一系列相对小的区域替代少数几个大的区域将得到更好的网格划分。

（7）如果最大响应位置已知或事先可以推测，就在附近放置一个关键点。

（8）如果是在交互方式下运行 ADAPT，而 ANSYS 在没有提示出错信息时突然退出，可以在 Jobmame.ADPT 文件中查看自适应网格划分部分以确定出错原因。同样，在批处理方式下运行 ADAPT 时，可以查看 Jobname.ADPT 以确定出错原因。

（9）如果模型中有些区域有过度扭曲，网格划分就会出错。在这种情况下，用 KESIZE 命令（Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→ManualSize→Keypoints→Picked

KPs）中 SIZE 域指定扭曲区域附近关键点的最大单元长度。同时，将 ADAPT 命令中的 FACMX 设为 1，阻止过度扭曲部分单元大小增加。

（10）应当存储结果文件（Jobname.RST 或 Jobname.RTH）。如果在 ADAPT 运行过程中程序发生中断，结果文件中将保存 ADAPT 过程已完成求解的内容。

（11）在自适应网格运行之前应输入 SAVE 命令（Utility Menu→File→Save as Jobname.db）。在程序出错中断时，可以用 Jobname.db 重新启动计算。

23.2 实例——二维对流传热的自适应分析

23.2.1 问题描述

对一个矩形截面梁应用自适应网格划分技术进行稳态热分析，矩形截面梁几何模型如图 23-3 所示，各参数为 a=1.0 m，b=0.6 m，d=0.2 m。矩形梁导热系数为 52 W/(m•K)，外表面的对流换热系数为 750 W/(m^2•K)。

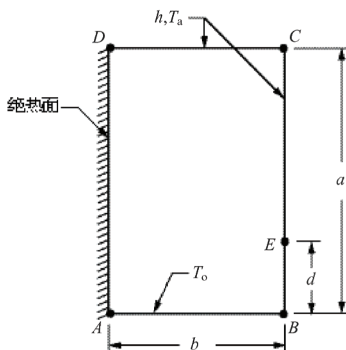


图 23-3 传热面几何模型

23.2.2 问题分析

本例采用二维四节点平面热分析 PLANE55 单元应用自适应网格划分技术进行有限元分析，图 23-4 所示为建立模型的关键点和线。

分析时，单位采用国际单位制，温度采用℃。

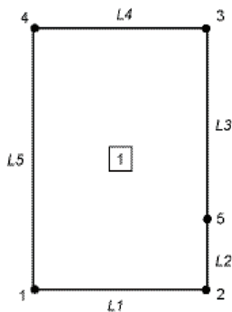


图 23-4 传热面建立模型关键点和线编号

23.2.3 GUI 操作步骤

1. 定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise23-1”，单击 OK 按钮。

2. 定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，在弹出的 Library of Element Types 对话框中选择 Plane55 单元，即先选中 Thermal Mass 中的 Solid 单元，再在右侧选择 Quad 4node 55 单元。确定选取正确后，单击 OK 按钮。

在 Element Types 对话框中，单击 Close 按钮。

3. 定义材料导热系数

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，弹出导热系数定义对话框。KXX 项设为 52.0，单击 OK 按钮。

4. 建立几何模型

（1）建立关键点：执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 菜单命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。NPT 项设为 1，其他项缺省，均默认为 0，单击 Apply 按钮，在原点处建立 1 号关键点。

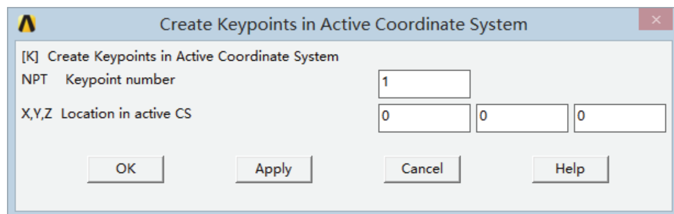


图 23-5 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

继续将 NPT 项设为 2，X、Y、Z 项分别设为 0.6、0、0，单击 Apply 按钮，建立 2 号关键点。

继续将 NPT 项设为 3，X、Y、Z 项分别设为 0.6、1.0、0，单击 Apply 按钮，建立 3 号关键点。

继续将 NPT 项设为 4，X、Y、Z 项分别设为 0、1.0、0，单击 Apply 按钮，建立 4 号关键点。

继续将 NPT 项设为 5，X、Y、Z 项分别设为 0.6、0.2、0，单击 OK 按钮，建立 5 号关键点。

（2）由关键点生成线：执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Lines→In Active Coord 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，依次拾取关键点 1 和 2、关键点 2 和 5、关键点 5 和 3、关键点 3 和 4、关键点 4 和 1、单击 OK 按钮，关闭关键点拾取对话框。

（3）由线生成面：执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→By Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，依次拾取所有线，单击 OK 按钮。

5．关闭智能网格划分

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→SmartSize→Basic 菜单命令，弹出 Basic SmartSize Settings 对话框，选中 Off 项，如图 23-6 所示，单击 OK 按钮，关闭智能网格划分。

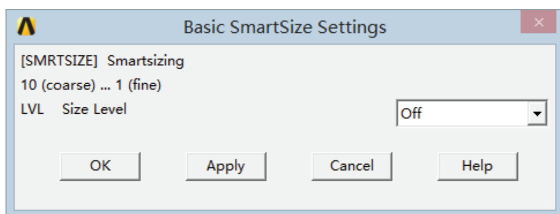


图 23-6　Basic SmartSize Settings 对话框

6．施加边界条件

（1）施加关键点温度值。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Keypoints 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，依次拾取关键点 1 和 2，单击 OK 按钮，弹出 Apply TEMP on Keypoints 对话框，选中 TEMP 项，输入“100”，单击 OK 按钮。

（2）施加对流换热载荷。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Convection→On Lines 菜单命令，弹出线拾取对话框，拾取模型右侧和顶部的线，单击 OK 按钮，弹出 Apply CONV on Lines 对话框，VAL1 项设为 750，VAL2 项设为 0，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP 项和 LINE 项，/NUM 项选中 Colors&Numbers，单击 OK 按钮。执行 Utility Menu→Plot→Areas 菜单命令，定义完载荷后的模型如图 23-7 所示。

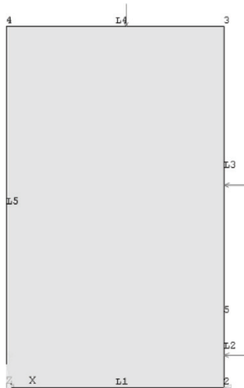


图 23-7　施加完载荷后的模型

7．进行自适应网格划分

执行 Main Menu→Solution→Solve→Adaptive Mesh 菜单命令，弹出 Adaptive Meshing and Solution 对话框，NSOLN 项设为 10，TTARGT 项设为 3，FACMN 项设为 0.2，FACMX 项设为 1，如图 23-8 所示，单击 OK 按钮。

程序进行自适应网格划分计算，由于没有达到所设置的计算循环次数要求但达到了热场要求的能量热误差率，循环过程结束，弹出图 23-9 所示的 Note 提示框，单击 Close 按钮。

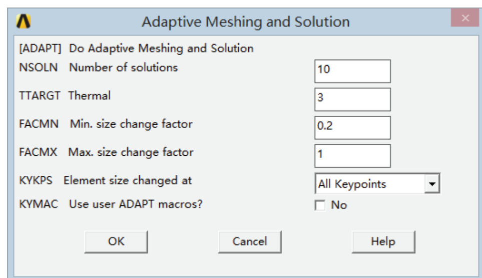


图 23-8 Adaptive Meshing and Solution 对话框

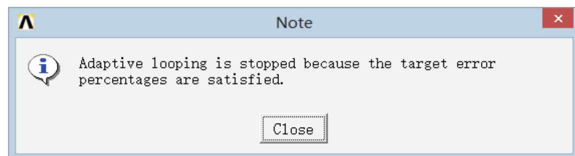


图 23-9 自适应网格划分结束提示

执行 Utility Menu→Plot→Elements 菜单命令，显示单元如图 23-10 所示。

8．显示温度结果

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。在 Nodal Solution 中选中 Nodal Temperature 选项，单击 OK 按钮。所得温度分布云图如图 23-11 所示。

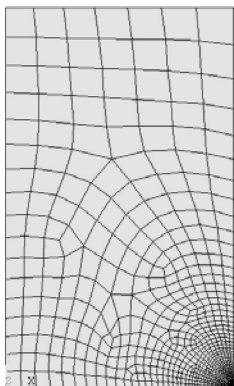


图 23-10 自适应网格划分单元

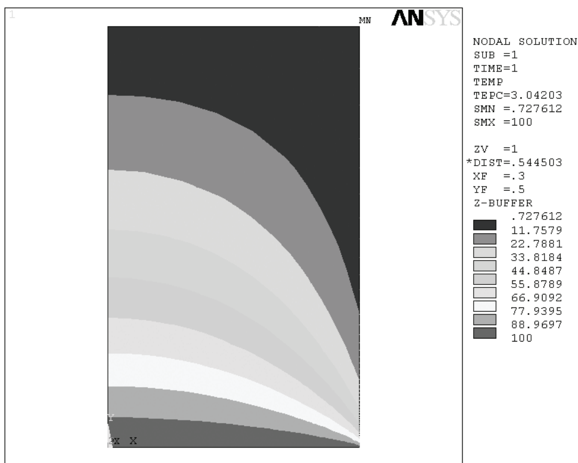


图 23-11 模型温度分布云图

9．提取热计算百分误差

执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，选中 Results data,Other operations，如图 23-12 所示，单击 OK 按钮，弹出 Get Data from Other POST1 Operations 对话框， Name of parameter to be defined 项设为 TEPC，再依次选中 Error estimation 和 Thermal%error，如图 23-13 所示，单击 OK 按钮。

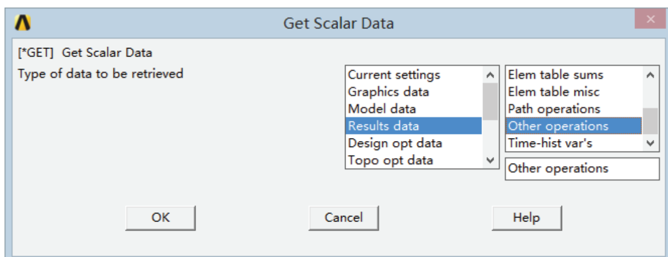


图 23-12 Get Scalar Data 对话框

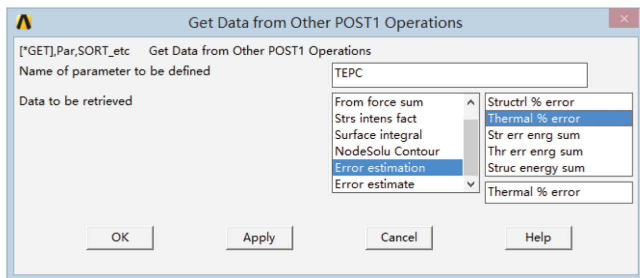


图 23-13 Get Data from Other POST1 Operations 对话框

10．提取关键点 5 的温度值

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Keypoints、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出关键点拾取对话框，输入“5”，按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮，选中关键点 5。

继续执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、Attached to、Keypoints、From Full，单击 OK 按钮，选中 5 号关键点上的节点。

（1）提取节点编号。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，选中 Model data 和 For selected set，如图 23-14 所示，单击 OK 按钮。弹出 Get Data for Selected Entity Set 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 N1，再依次选中 Current node set 和 Highest node num，如图 23-15 所示，单击 OK 按钮。

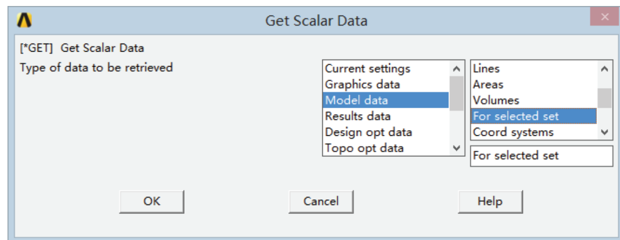


图 23-14 Get Scalar Data 对话框

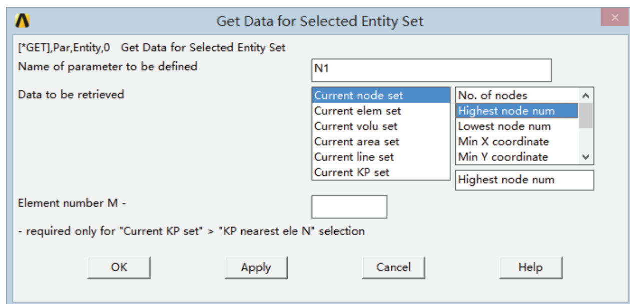


图 23-15 Get Data for Selected Entity Set 对话框

（2）提取节点温度值。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，选中 Results data 和 Nodal results，如图 23-16 所示，单击 OK 按钮。弹出 Get Nodal Results Data 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 TEMP1，在 Node number N 项设为 N1，再依次选中 DOF solution 和 Temperature TEMP，如图 23-17 所示，单击 OK 按钮。

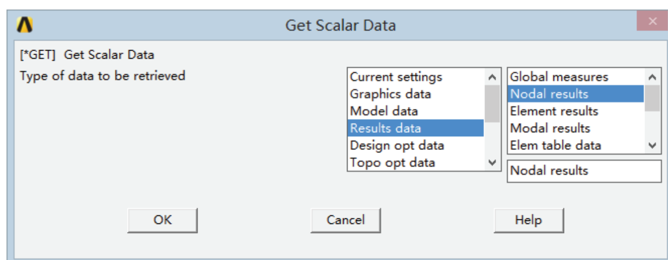


图 23-16 Get Scalar Data 对话框

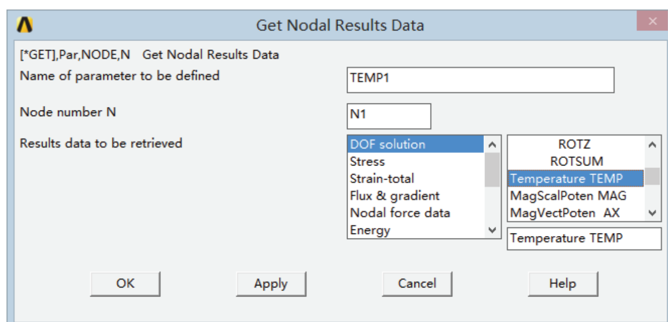


图 23-17 Get Nodal Results Data 对话框

11．列表提取的参数值

执行 Utility Menu→List→Other→Parameters 菜单命令，弹出*STAT Command 窗口，显示所定义的参数值，如图 23-18 所示。

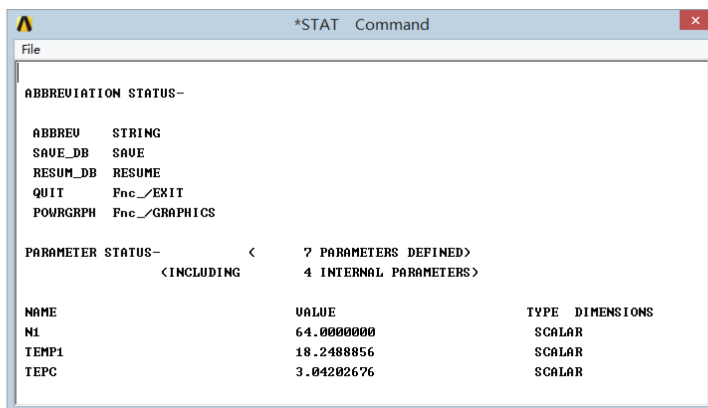


图 23-18 *STAT Command 窗口

12．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

23.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise23
/PREP7                                  !进入前处理器
```

```
SMRT,OFF                          !关闭智能网格划分
ANTYPE,STATIC                     !设置为稳态分析
ET,1,PLANE55                      !定义单元类型
MP,KXX,1,52.0                     !定义材料属性
K,1                               !定义 1 号关键点
K,2,.6                            !定义 2 号关键点
K,3,.6,1.0                        !定义 3 号关键点
K,4,,1.0                          !定义 4 号关键点
K,5,.6,.2                         !定义 5 号关键点
L,1,2                             !定义 1 号线
L,2,5                             !定义 2 号线
L,5,3                             !定义 3 号线
L,3,4                             !定义 4 号线
L,4,1                             !定义 5 号线
AL,ALL                            !建立面
DK,1,TEMP,100,,1                  !定义关键点 1 的温度值
DK,2,TEMP,100,,1                  !定义关键点 2 的温度值
SFL,2,CONV,750.0,,0.0             !定义线 2 的对流换热系数值
SFL,3,CONV,750.0,,0.0             !定义线 3 的对流换热系数值
SFL,4,CONV,750.0,,0.0             !定义线 4 的对流换热系数值
/PNUM,KP,1                        !显示关键点编号
/PNUM,LINE,1                      !显示线编号
FINISH
ADAPT,10,,3,0.2,1                 ! 定义自适应网格划分
/POST1
PLNSOL,TEMP                       ! 显示温度分布云图
/GRAPHICS,FULL                    ! 关闭图形显示
*GET,TEPC,PRERR,,TEPC             ! 提取热计算百分误差
KSEL,,,,5                         ! 选择关键点 5
NSLK                              ! 选择关键点 5 位置的节点
*GET,N1,NODE,,NUM,MAX             ! 提取节点编号
*GET,TEMP1,NODE,N1,TEMP           ! 提取节点温度值
*status,parm                      ! 列表参数值
FINISH
/EXIT,NOSAV                       !退出 ANSYS
```

23.3 本章小结

本章主要介绍了工程中常用到的自适应网格划分技术。首先简单介绍了自适应网格划分技术的概念和使用条件，详细讲述了自适应网格划分技术的应用方法及注意事项分技术提供技术指导。通过一个实例的实践学习，帮助读者掌握自适应网格划分技术的应用步骤和参数设置方法。



第 24 章　单元生死技术

ANSYS 软件提供了单元生死技术，该技术经常应用于一些工程分析中，为解决实际问题提供了便利。本章分别对单元生死技术的计算原理、应用前提以及使用方法进行了详细介绍，并通过工程实例讲述使用单元生死技术的基本步骤和技巧。

学习目标：

（1）了解 ANSYS 单元生死技术的概念、基本原理和应用方法；

（2）通过实例学习 ANSYS 中单元生死技术的操作步骤。

24.1　单元生死技术概述

单元生死技术主要用于钻孔（如开矿和挖隧道等）、建筑物施工过程（如桥的建筑过程）、顺序组装（如分层的计算机芯片组装）和另外一些用户可以根据单元位置来方便地激活和不激活它们的一些应用中。单元生死功能只适用于 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical 和 ANSYS/Structural 产品。

24.1.1 单元的生和死的定义

如果向模型中加入（或删除）材料，模型中相应的单元就“存在”（或消亡）。单元生死选项就用于在这种情况下杀死或重新激活选择的单元。支持单元生死选项的单元列于表 24-1。

表 24-1　支持单元生死选项的单元

SOLID5	SOLID65	SOLID123	CONTA175	SHELL208
LINK11	LINK68	SHELL131	CONTA176	SHELL209
PLANE13	SOLID70	SHELL132	CONTA177	PLANE230
COMBIN14	MASS71	SURF151	LINK180	SOLID231
MASS21	PLANE75	SURF152	SHELL181	SOLID232
PLANE25	PLANE77	SURF153	PLANE182	HSFLD241
MATRIX27	PLANE78	SURF154	PLANE183	HSFLD242
LINK31	PLANE83	SHELL157	MPC184-Link/Beam	REINF264
LINK33	SOLID87	SURF159	SOLID185	SOLID272
LINK34	SOLID90	TARGE169	SOLID186	SOLID273
PLANE35	SOLID96	TARGE170	SOLID187	SOLID285
SHELL41	SOLID97	CONTA171	BEAM188	PIPE288

（续）

PLANE53	SOLID98	CONTA172	BEAM189	PIPE289
PLANE55	PLANE121	CONTA173	SOLSH190	ELBOW290
SOLID62	SOLID122	CONTA174	FOLLW201	

在一些情况下，单元的生死状态可以根据 ANSYS 的计算数值决定，如温度、应力、应变等。用户可以用 ETABLE 命令（Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table）和 ESEL 命令（Utility Menu→Select→Entities）来确定所选单元的相关数据，也可以改变单元的状态（溶和、固结、俘获等）。

本过程对于由相变引起的模型效应（如焊接过程中原不生效的熔融材料变为生效的模型体的一部分）、失效扩展和另外一些分析过程中的单元变化是有效的。

24.1.2 单元生死的基本原理

要激活“单元死”的效果，ANSYS 程序并不是将“杀死”的单元从模型中删除，而是将其刚度（或传导，或其他分析特性）矩阵乘以一个很小的因子 ESTIF。因子默认值为 1.0E-6，也可以赋为其他数值。

死单元的单元载荷将为 0，从而不对载荷向量生效（但仍然在单元载荷的列表中出现）。同样，死单元的质量、阻尼、比热和其他类似效果也设为 0 值。死单元的质量和能量将不包括在模型求解结果中。单元的应变在“杀死”的同时也将设为 0。

与上面的过程相似，如果单元“出生”，并不是将其加到模型中，而是重新激活它们。用户必须在 PREP7 中生成所有单元，包括后面要被激活的单元。在求解器中不能生成新的单元。要“加入”一个单元，先杀死它，然后在合适的载荷步中重新激活它。

当一个单元被重新激活时，其刚度、质量、单元载荷等将恢复其原始的数值。重新激活的单元没有应变记录（也无热量存储等）。但是，初应变以实参形式输入的不为单元生死选项所影响。而且，除非是打开了大变形选项（NLGEOM,ON）一些单元类型将以它们以前的几何特性恢复（大变形效果有时用来得到合理的结果）。如果单元承受热量体载荷，那么单元在被激活后第一个求解过程中同样可以有热应变（等于 a*(T-TREF)）。

24.1.3 单元生死技术的应用方法

可以在大多数静态和非线性瞬态分析中使用单元生死，其基本过程与相应的分析过程是一致的。对于其他分析来说，这个过程主要包括以下 3 步。

1．建模

在 PREP7 中生成所有单元，包括那些只有在以后载荷步中才激活的单元。在 PREP7 外不能生成新的单元。

2．施加载荷并求解

在 SOLUTION 中完成以下操作。

（1）定义第一个载荷步：在第一个载荷步中，用户必须选择分析类型和所有的分析选项。用下列方法指定分析类型。

GUI 操作：执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令。

命令：ANTYPE

在结构分析中，大变形效果应打开。用下列命令设置该选项。

GUI 操作：执行 Main Menu→Solution→Analysis Options 菜单命令

命令：NLGEOM,ON

对于所有单元生死应用，在第一个载荷步中应设置牛顿-拉夫森选项，因为程序不能预知 EKILL 命令出现在后面的载荷步中。用下列命令完成该操作。

GUI 操作：执行 Main Menu→Solution→Analysis Options 菜单命令

命令：NROPT

杀死（EKILL）所有要加入到后续载荷步中的单元，用下列命令。

GUI 操作：执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Birth & Death→Kill Elements 菜单命令

命令：EKILL

注意：单元在载荷步的第一个子步被杀死（或激活），然后在整个载荷步中保持该状态。要注意保证使用默认的矩阵缩减因子不会引起一些问题。有些情况下要考虑用严格的缩减因子。

用下列方法指定缩减因子数值。

GUI 操作：执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Birth&Death→StiffnessMult 菜单命令，打开 Stiffness Matrix Multplier for Killed Elements 对话框，如图 24-1 所示。

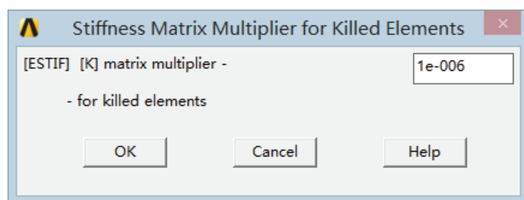


图 24-1 Stiffness Matrix Multplier for Killed Elements 对话框

命令：ESTIF

不与任何激活的单元相连的节点将“漂移”，或具有浮动的自由度数值。在一些情况下，用户可能想约束不被激活的自由度（D,CP 等）以减少要求解的方程数目，并防止出现位置错误。约束非激活自由度时，当重新激活的单元是特定的（或温度等）时很有影响，因为在重新激活单元时要删除这些人为的约束，同时要删除非激活自由度的节点载荷（也就是不与任意激活的单元相连的节点）。同样，用户必须重新激活在自由度上施加的新的节点载荷。

下面是第一个载荷步实例。

```
!第一个载荷步
TIME,...                    !设置时间值（静力分析选项）
NLGEOM,ON                   !打开大位移效果
NROPT,FULL                  !设置牛顿-拉夫森选项
ESTIF,...                   !设置非缺省缩减因子（可选）
ESEL,...                    !选择在本载荷步中将不激活的单元
```

```
EKILL,...                          !不激活选择的单元
ESEL,S,LIVE                        !选择所有活动单元
NSLE,S                             !选择所有活动节点
NSEL,INVE                          !选择所有非活动节点（不与活动单元相连的节点）
D,ALL,ALL,0                        !约束所有不活动的节点自由度（可选）
NSEL,ALL                           !选择所有节点
ESEL,ALL                           !选择所有单元
D,...                              !施加合适的约束
F,...                              !施加合适的活动节点自由度载荷
SF,...                             !施加合适的单元载荷
BF,...                             !施加合适的体载荷
SAVE
SOLVE
```

提示：具体各个命令的详细解释，可在 ANSYS 帮助文件中查阅。

（2）后续载荷步：可以随意杀死或重新激活单元，同时，要正确地施加和删除约束和节点载荷。

用下列命令杀死单元。

GUI 操作：执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other→Birth & Death→Kill Elements 菜单命令

命令：EKILL

用下列命令重新激活单元。

GUI 操作：执行 Main Menu→Solution→Load Step Opts→Other>Birth & Death→Activate Elem 菜单命令

命令：EALIVE

下面是第二个载荷步实例。

```
! 第二个或后继载荷步：
TIME,...
ESEL,...
EKILL,...              !杀死选择的单元
ESEL,...
EALIVE,...             !重新激活选择的单元
...
FDELE,...              !删除不活动自由度的节点载荷
D,...                  !约束不活动自由度
...
F,...                  !在活动自由度上施加合适的节点载荷
DDELE,...              !删除重新激活的自由度上的约束
SAVE
SOLVE
```

提示：具体各个命令的详细解释，可在 ANSYS 帮助文件中查阅。

3．查看结果

通常，用户在对包含不激活或重新激活的单元操作时，应按照标准的过程来做。

注意：“杀死”的单元仍在模型中，尽管其对刚度（传导）矩阵的贡献可以忽略。因此，它们将包括在单元显示、输出列表等操作中。例如，不激活的单元在节点结果平均（执行 PLNSOL 命令或 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Nodal Solu 菜单命令）时将“污染”结果。整个不激活单元的输出应当被忽略，因为很多项带来的效果都很小。建议在单元显示和其他后处理操作前用选择功能将不激活的单元从选择集中选出来。

24.1.4 使用 ANSYS 结果控制单元生死

在许多时候，用户并不清楚杀死和重新激活单元的确切位置。例如，要在热分析中“杀死”熔融的单元（在模型中移去熔化的材料），事先不会知道这些单元的位置。因此，必须根据 ANSYS 计算出的温度确定这些单元。

当依靠 ANSYS 计算结果（如温度、应力、应变等）决定杀死或重新激活单元时，可以使用命令识别并选择关键单元。

用下列方法建立单元数组。

GUI 操作：执行 Main Menu→General Postproc→Element Table→Define Table 菜单命令

命令：ETABLE

用下列方法选择关键单元。

GUI 操作：执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令

命令：ESEL

然后用户可以杀死或重新激活选择的单元（也可以用 ANSYS APDL 语言编写宏以完成这些操作）。

24.1.5 单元生死技术的注意事项

在使用单元生死技术时，要注意以下事项。

1）不活动的自由度上不能施加约束方程（CE,CEINTF），当节点不与活动的单元相连时出现不活动的自由度。

2）可以通过先杀死然后重新激活的方法进行应力松弛分析，例如退火。

3）在非线性分析中，注意不要因为杀死或重新激活单元引起奇异性（如结构分析中的尖角）或刚度突变，这将使收敛困难。

4）如果模型除了生死单元部分是线性的，即不存在接触单元和其他非线性单元，并且材料也是线性的，ANSYS 将进行线性分析，不打开大变形效应。

5）在有单元生死的分析中打开 FULL 牛顿-拉夫森方法的适应下降选项将得到好的结果。通过执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→Analysis Options 菜单命令或命令 NROPT,FULL,ON，打开 FULL 牛顿-拉夫森方法。

6）可以通过一个参数值来指示单元生死状态，执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令或者命令（*GET,Par,ELEM,n,ATTR,LIVE），该参数可以用于 APDL 逻辑分支（*IF 等）或其他要控制单元生死的应用场合中。

7）求解多载荷步的多载荷步文件（LSWRITE）不能使用单元生死技术，因为 LSWRITE 命令不在载荷步文件中写入未激活单元的状态。要求解含生死单元的多载荷步分析，必须使用一系列 SOLVE 命令来实现。

用户也可以通过改变材料特性的方式来杀死或重新激活单元 MPCHG（执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Change Mat Num 菜单命令）。但是，在这个过程中要特别小心，因为在求解过程中，对于“杀死单元”的软件保护系统和限制并不应用于改变材料属性来实现的单元，例如，单元集中力并不自动删除，应变、质量和比热等也不能删除。

MPCHG 命令的不当使用将带来许多问题，例如，如果将单元的刚度缩减到近于 0，而保留其质量，在有加速度和惯性载荷的问题中将产生奇异性。

一个 MPCHG 的应用是在建立模型时涉及“出生”单元的应变历程的情况下，使用 MPCHG 可以得到单元在变形的节点构造中的初始应变。

24.2 实例——利用单元生死技术堆积单元模拟焊接过程

24.2.1 问题描述

如图 24-2 所示，对两种不同材质的钢材 1 和钢材 3 进行焊接，中间焊接材料为钢材 2。焊接件初始温度为 20℃，中间焊接材料初始温度为 1500℃，忽略模型与外界的对流和辐射换热。结构左面固定约束，左右两面均保持 20℃。求焊接过程的温度变化情况以及焊接完成后的残余应力。

焊接件及焊接材料的材料属性列于表 24-2、表 24-3、表 24-4 中。

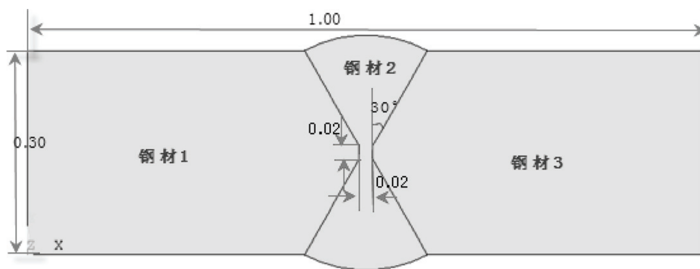


图 24-2 几何模型图

表 24-2 材料参数表

材料名称	导热系数 /（W/(m•℃)）	密度 /（kg/m^3）	比热容/（J/(kg•℃)）	相对磁导率	热膨胀系数 /（m/℃）	泊松比
钢材 1	33	7850	561	1	1.23e-5	0.3
钢材 2	32	7770	683	1	1.38e-5	0.29
钢材 3	34	7860	983	1	1.48e-5	0.29

表 24-3　材料弹性模量列表/GPa

温度	20℃	500℃	800℃	1200℃	1500℃
钢材 1	209	172	133	84	45
钢材 2	216	178	142	104	68
钢材 3	212	175	139	107	83

表 24-4　材料双线性随动强化参数列表

温度		20℃	500℃	800℃	1200℃	1500℃
钢材 1	屈服应力/MPa	315	212	153	93	33
	唐氏模量/GPa	20.9	17.2	13.3	8.4	4.5
钢材 2	屈服应力/MPa	314	203	153	63	13
	唐氏模量/GPa	21.6	17.8	14.2	10.4	6.8
钢材 3	屈服应力/MPa	330	213	153	73	13
	唐氏模量/GPa	21.2	17.5	13.9	10.7	8.3

24.2.2 问题分析

本例为相变过程，焊缝材料由下而上堆积，因此先杀死上层单元，并向下层单元施加初始焊接温度。焊接完成后，删除刚才施加的焊接温度约束条件，同时激活下一层焊接元素，依此类推，直到整个焊缝焊接完成。

结合单元生死技术模拟焊接的相变过程，假定每次焊接所需要的时间为 5 s，焊接初始化时间 0.001 s。分析采用国际单位制，温度采用℃。

24.2.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise24-1”，单击 OK 按钮。

2．定义单元类型

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的 Element Types 对话框中单击 Add 按钮，在弹出的 Library of Element Types 对话框中选择 Plane13 单元，即先选中 Coupled Field，再在右侧选择 Vector Quad 13。确定选取正确后，单击 OK 按钮。

在 Element Types 对话框中，选中 Type 1 PLANE13，单击 Options 按钮，弹出 PLANE13 element type options 对话框，K1 项选择 UX UY TEMP AZ，K3 项选择 Plane stress，单击 OK 按钮。

重复以上过程，定义 2 号 PLANE13 单元，并定义单元选项。在 Element Types 对话框中，单击 Close 按钮。

3．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。

（1）定义钢材 1 的材料属性。

1）定义钢材 1 的导热系数。选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，KXX 项设为 33，单击 OK 按钮。

2）定义钢材 1 的密度。继续执行 Material Models Available→Thermal→Density 菜单命令，弹出 Density for Material Number1 对话框，定义固定钢环的密度。DENS 项设为 7850，单击 OK 按钮。

3）定义钢材 1 的比热容。继续执行 Material Models Available→Thermal→Specific Heat 菜单命令，弹出 Specific Heat for Material Number1 对话框，定义固定钢环的比热容。C 项设为 561，单击 OK 按钮。

4）定义钢材 1 的相对磁导率。继续执行 Electromagneics→Relative Permeability→Constant 菜单命令，弹出 Permeability for Material Number 1 对话框，NURX 项设为 1，单击 OK 按钮。

5）定义钢材 1 的弹性模量和泊松比。继续执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出弹性模量定义对话框。在对话框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T5，按照表 24-3 输入钢材 1 的弹性模量，泊松比输入 0.30。单击右下角的 Graph 按钮，钢材 1 弹性模量随温度变化的曲线如图 24-3 所示，单击 OK 按钮。

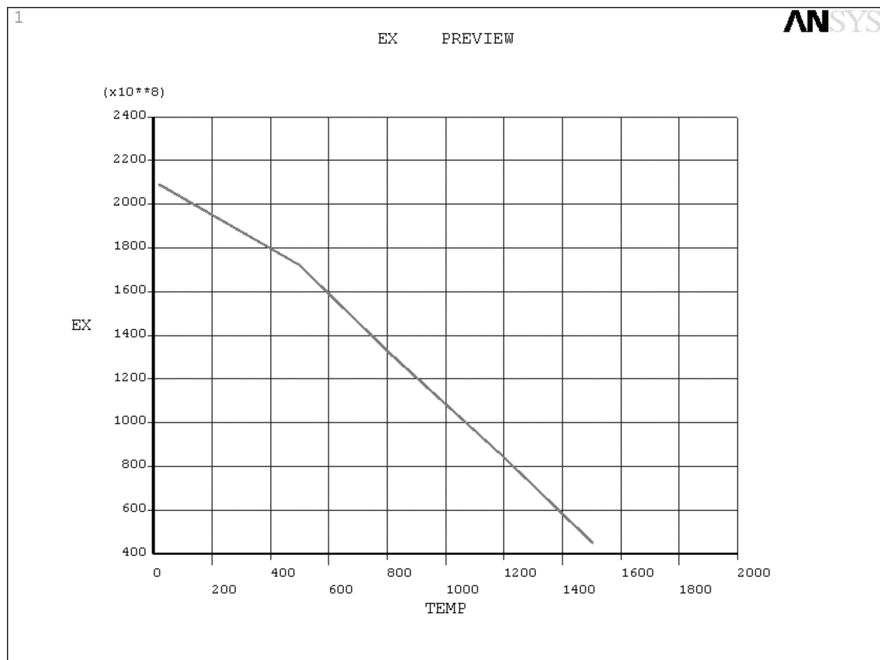


图 24-3 钢材 1 弹性模量随温度变化的曲线

6）定义钢材 1 的热膨胀系数。继续执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic 菜单命令，Reference temperature 项设为 20，ALPX 项设为 1.23E-5，单击 OK 按钮。

7）定义钢材 1 的双线性随动强化参数。继续执行 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinemtic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear 菜单命令，弹出 Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 1 对话框，在对话框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T5，按照表 24-4 输入唐氏模量和屈服应力，如图 24-4 所示，单击右下角的 Graph 按钮，绘制钢材 1 双线性随动强化参数曲线，如图 24-5 所示，单击 OK 按钮。

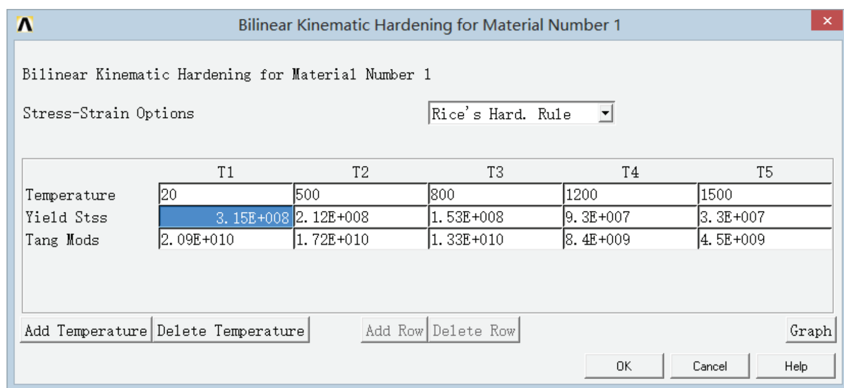


图 24-4　Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 1 对话框

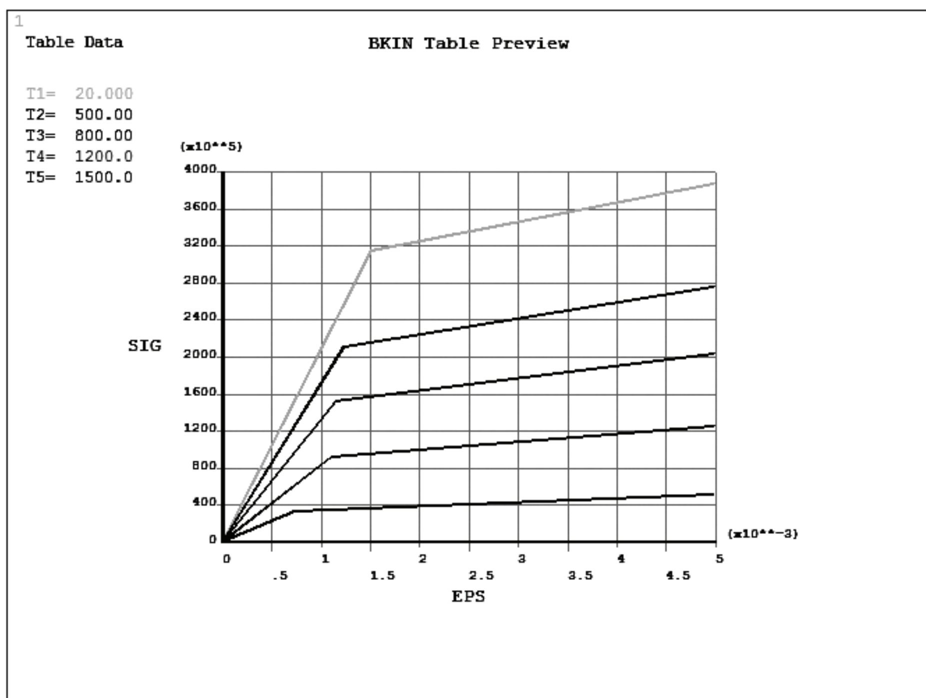


图 24-5　钢材 1 双线性随动强化参数曲线

（2）定义钢材 2 的材料属性。

在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认 ID 为 2，单击 OK 按钮。

1）定义钢材 2 的导热系数。选中 Material Model Number 2，执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，KXX 项设为 32，单击 OK 按钮。

2）定义钢材 2 的密度。继续执行 Material Models Available→Thermal→Density 菜单命令，弹出 Density for Material Number 2 对话框，定义固定钢环的密度。DENS 项设为 7770，单击 OK 按钮。

3）定义钢材 2 的比热容。继续执行 Material Models Available→Thermal→Specific Heat 菜单命令，弹出 Specific Heat for Material Number 2 对话框，定义固定钢环的比热容。C 项设为 683，单击 OK 按钮。

4）定义钢材 2 的相对磁导率。继续执行 Electromagneics→Relative Permeability→Constant 菜单命令，弹出 Permeability for Material Number 2 对话框，NURX 项设为 1，单击 OK 按钮。

5）定义钢材 2 的弹性模量和泊松比。继续执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出弹性模量定义对话框。在对话框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T5，按照表 24-3 输入钢材 2 的弹性模量，泊松比输入 0.29。单击右下角的 Graph 按钮，钢材 2 弹性模量随温度变化的曲线如图 24-6 所示，单击 OK 按钮。

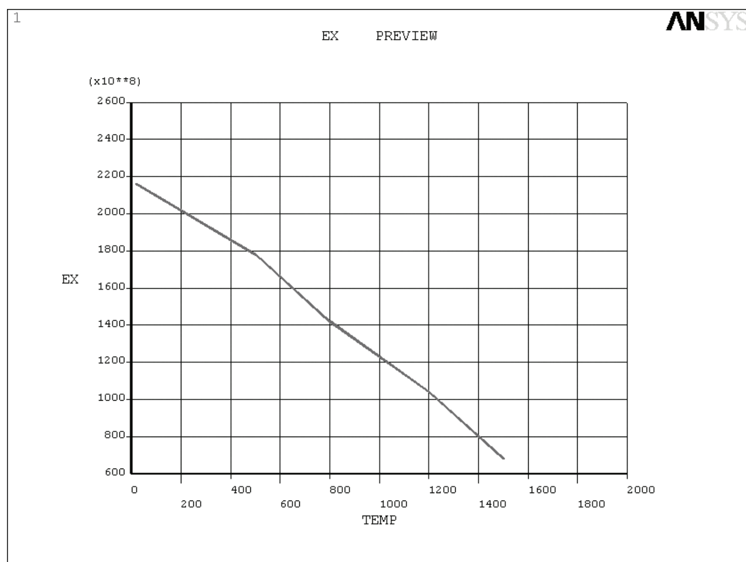


图 24-6 钢材 2 弹性模量随温度变化的曲线

6）定义钢材 2 的热膨胀系数。继续执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic 菜单命令，Reference temperature 项设为 150，ALPX 项设为 1.38E-5，单击 OK 按钮。

7）定义钢材 2 的双线性随动强化参数。继续执行 Material Models Available→Structural

→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinemtic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear 菜单命令，弹出 Bilinear Kinemtic Hardening for Material Number 2 对话框，在对话框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T5，按照表 24-4 输入唐氏模量和屈服应力，单击右下角的 Graph 按钮，绘制钢材 2 双线性随动强化参数曲线，如图 24-7 所示，单击 OK 按钮。

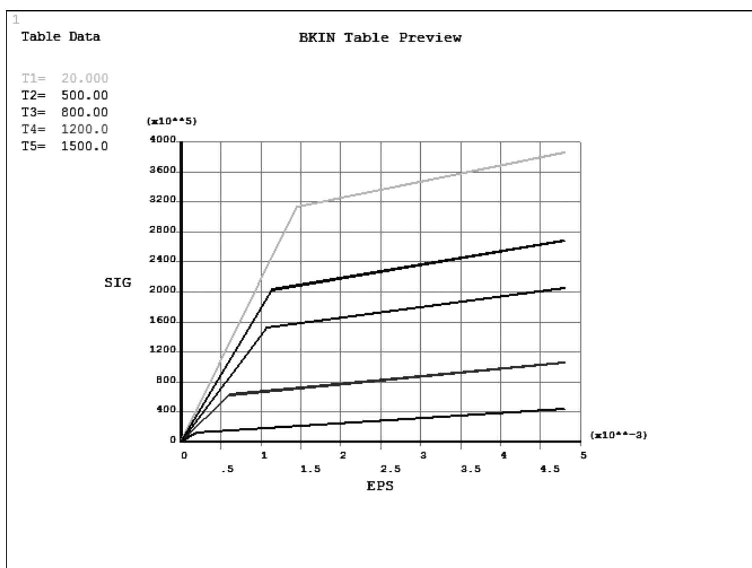


图 24-7 钢材 2 双线性随动强化参数曲线

（3）定义钢材 3 的材料属性。

在 Define Material Model Behavior 对话框中，执行 Material→New Model 菜单命令，弹出 Define Material ID 对话框，取默认 ID 为 3，单击 OK 按钮。

1）定义钢材 3 的导热系数。选中 Material Model Number 3，执行 Material Models Available→Thermal→Conductivity→Isotropic 菜单命令，KXX 项设为 34，单击 OK 按钮。

2）定义钢材 3 的密度。继续执行 Material Models Available→Thermal→Density 菜单命令，弹出 Density for Material Number 3 对话框，定义固定钢环的密度。DENS 项设为 7850，单击 OK 按钮。

3）定义钢材 3 的比热容。继续执行 Material Models Available→Thermal→Specific Heat 菜单命令，弹出 Specific Heat for Material Number 3 对话框，定义固定钢环的比热容。C 项设为 983，单击 OK 按钮。

4）定义钢材 3 的相对磁导率。继续执行 Electromagneics→Relative Permeability→Constant 菜单命令，弹出 Permeability for Material Number 3 对话框，NURX 项设为 1，单击 OK 按钮。

5）定义钢材 3 的弹性模量和泊松比。继续执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出弹性模量定义对话框。在对话框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T5，按照表 24-3 输入钢材 3 的弹性模量，泊松比输入 0.29。单击右下角的 Graph 按钮，钢材 3 弹性模量随温度变化的曲线如图 24-8 所示，单击 OK 按钮。



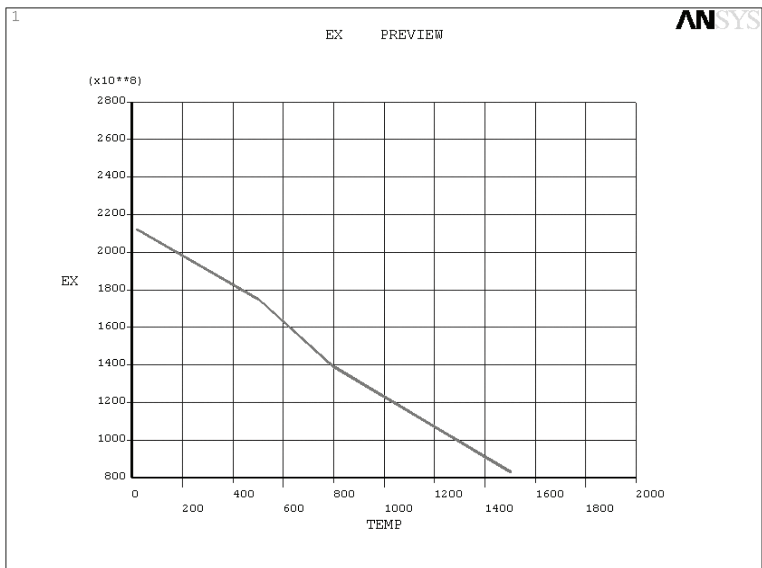


图 24-8 钢材 3 弹性模量随温度变化的曲线

6）定义钢材 3 的热膨胀系数。继续执行 Material Models Available→Structural→Thermal Expansion→Secant Coefficient→Isotropic 菜单命令，Reference temperature 项设为 20，ALPX 项设为 1.48E-5，单击 OK 按钮。

7）定义钢材 3 的双线性随动强化参数。继续执行 Material Models Available→Structural→Nonlinear→Inelastic→Rate Independent→Kinemtic Hardening Plasticity→Mises Plasticity→Bilinear 菜单命令，弹出 Bilinear Kinemtic Hardening for Material Number 3 对话框，在对话框左下角单击 Add Temperature 按钮，增加温度到 T5，按照表 24-4 输入唐氏模量和屈服应力，单击右下角的 Graph 按钮，绘制钢材 3 双线性随动强化参数曲线，如图 24-9 所示，单击 OK 按钮。

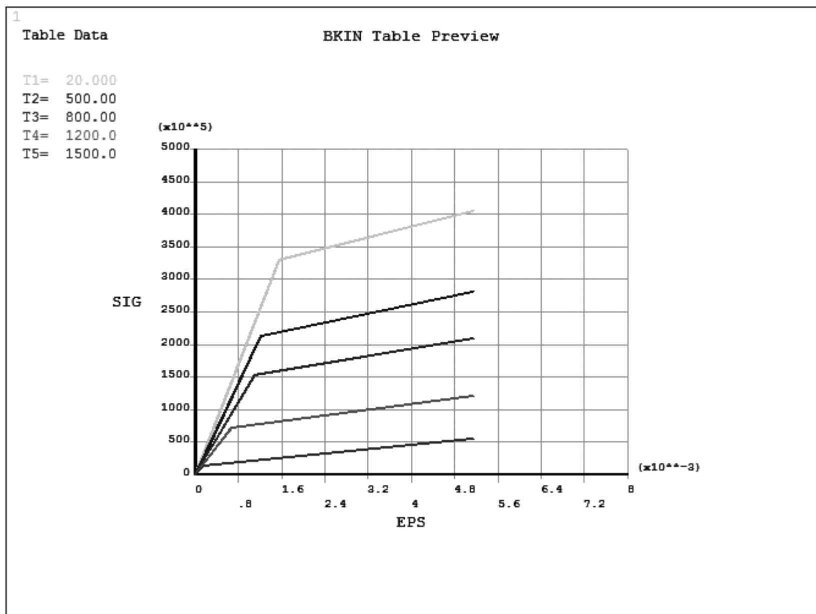


图 24-9 钢材 3 双线性随动强化参数曲线

4. 选择使用的角度制

执行 Utility Menu→Parameters→Angular Units 菜单命令，弹出 Angular Units for Parametric Functions 对话框，选中 Degrees DEG，如图 24-10 所示，单击 OK 按钮。

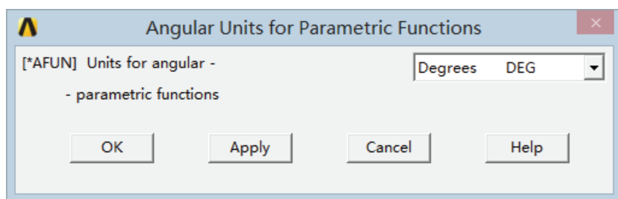


图 24-10 Angular Units for Parametric Functions 对话框

5. 定义参数

在命令窗口输入以下参数定义：

```
width=1
height=0.3
ar=0.14*tan(30)
ex=0.01*tan(60)
df=ar+ex
cf=df/cos(60)
```

6. 建立几何模型

执行 Utility Menu→WorkPlane→Change Active CS to→Global Cartesian 菜单命令，激活全局笛卡儿坐标系。

（1）定义关键点。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Keypoints→In Active CS 菜单命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框， NPT 项设为 1，X、Y、Z 项分别设为 0、0、0，单击 Apply 按钮，建立 1 号关键点。

继续将 NPT 项设为 2，X、Y、Z 项分别设为 width/2-0.01-ar、0、0，单击 Apply 按钮，建立 2 号关键点。

继续将 NPT 项设为 3，X、Y、Z 项分别设为 width/2+0.01+ar、0、0，单击 Apply 按钮，建立 3 号关键点。

继续将 NPT 项设为 4，X、Y、Z 项分别设为 width、0、0，建立 4 号关键点。

继续将 NPT 项设为 5，X、Y、Z 项分别设为 width/2-0.01、height/2-0.01、0，建立 5 号关键点。

继续将 NPT 项设为 6，X、Y、Z 项分别设为 width/2+0.01、height/2-0.01、0，建立 6 号关键点。

继续将 NPT 项设为 7，X、Y、Z 项分别设为 width/2-0.01、height/2+0.01、0，建立 7 号关键点。

继续将 NPT 项设为 8，X、Y、Z 项分别设为 width/2+0.01、height/2+0.01、0，建立 8 号关键点。

继续将 NPT 项设为 9，X、Y、Z 项分别设为 0、height、0，建立 9 号关键点。

继续将 NPT 项设为 10，X、Y、Z 项分别设为 width/2-0.01-ar、height、0，建立 10 号关键点。

继续将 NPT 项设为 11，X、Y、Z 项分别设为 width/2+0.01+ar、height、0，建立 11 号关键点。

继续将 NPT 项设为 12，X、Y、Z 项分别设为 width、height、0，单击 OK 按钮，建立 12 号关键点。

建立关键点及编号如图 24-11 所示。

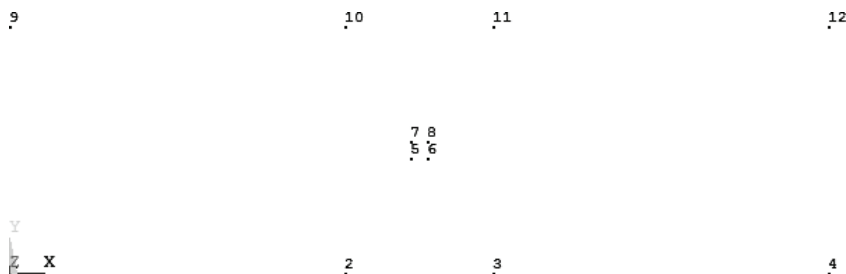


图 24-11 关键点及编号示意图

（2）定义曲线。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Lines→Arcs→By End KPs& Rad 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，拾取关键点 10 和 11，单击 Apply 按钮；继续拾取关键点 7，单击 Apply 按钮，弹出 Arc by End KPs & Radius 对话框，RAD 项设为 cf，P1,P2 以及 PC 项按照前面拾取的关键点自动获取，如图 24-12 所示，单击 Apply 按钮。

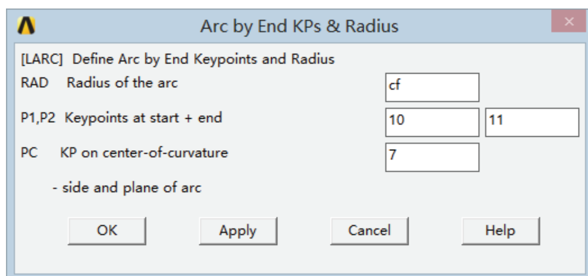


图 24-12 Arc by End KPs & Radius 对话框

继续在弹出的关键点拾取对话框中拾取关键点 2 和 3，单击 Apply 按钮；继续拾取关键点 5，单击 Apply 按钮，弹出 Arc by End KPs & Radius 对话框，RAD 项设为 cf，P1,P2 以及 PC 项按照前面拾取的关键点自动获取，单击 OK 按钮。

（3）定义面。

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Areas→Arbitrary→Through KPs 菜单命令，弹出关键点拾取对话框，依次拾取关键点 1、2、5、7、10、9，单击 Apply 按钮，建立 1 号面，为左侧焊接件。

继续依次拾取关键点 3、4、12、11、8、6，建立 2 号面，为右侧焊接件。

继续依次拾取关键点 2、3、6、5，建立 3 号面，为焊缝材料下部分区域。

继续依次拾取关键点 5、6、8、7，建立 4 号面，为焊缝材料中间区域。

继续依次拾取关键点 7、8、11、10，建立 5 号面，为焊缝材料上部分区域。

（4）显示关键点和线编号。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，选中 KP、LINE，/NUM 项选中 Colors & numbers，如图 24-13 所示，单击 OK 按钮。执行 Utility Menu→Plot→Lines 菜单命令，显示关键点及线编号，如图 24-14 所示。

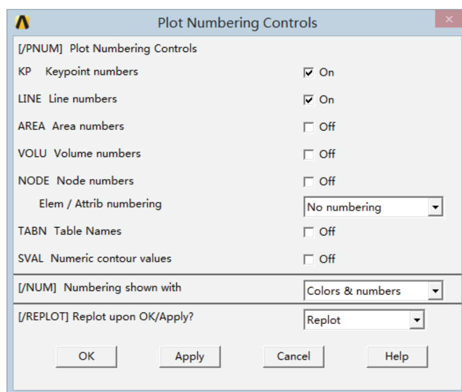


图 24-13 Plot Numbering Controls 对话框

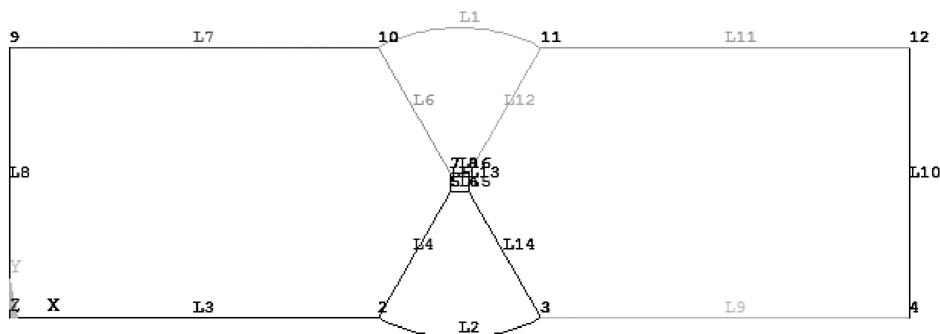


图 24-14 模型线和关键点编号

（5）显示面。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，将 KP 和 LINE 项取消选择，选中 AREA，/NUM 项选中 Colors & numbers，单击 OK 按钮。执行 Utility Menu→Plot→Areas 菜单命令，显示面，如图 24-15 所示。

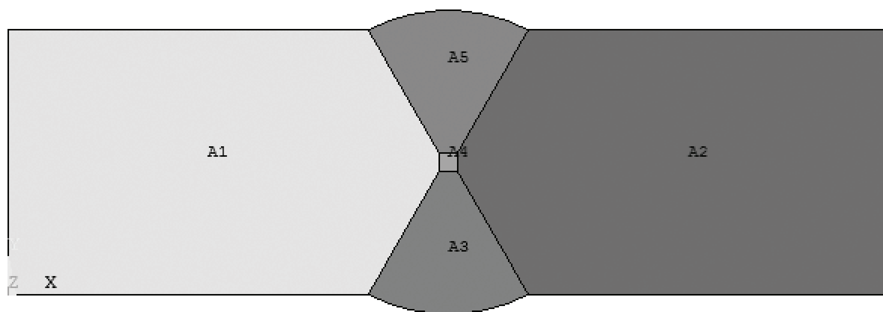


图 24-15 几何模型

7．赋予模型材料和单元属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh Attributes→Picked Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取建立的 1 号面，单击 Apply 按钮，弹出 Areas Attributes 对话框，MAT 和 TYPE 项分别选择 1 和 1 PLANE13，单击 Apply 按钮，完成左侧焊接件的定义。

在弹出的面拾取对话框中，拾取 2 号面，单击 Apply 按钮，弹出 Areas Attributes 对话框，MAT 和 TYPE 项分别选择 3 和 1 PLANE13，单击 Apply 按钮，完成右侧焊接件的定义。

在弹出的面拾取对话框中，拾取 3 号面、4 号面和 5 号面，单击 OK 按钮，弹出 Areas Attributes 对话框，MAT 和 TYPE 项分别选择 2 和 2 PLANE13，单击 OK 按钮，完成焊缝材料的定义。

8．划分单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，在弹出的 Global Element Sizes 对话框中，SIZE 项设为 0.02，单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Areas→Mapped→By Corners 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取 4 号面，单击 Apply 按钮，输入“7”，按〈Enter〉键确认，再依次输入 8、6、5，分别按〈Enter〉键确认，单击 Apply 按钮。

再拾取 5 号面，单击 Apply 按钮，再依次输入“10”“11”“8”，分别按〈Enter〉键确认，单击 Apply 按钮。

再拾取 3 号面，单击 Apply 按钮，再依次输入“2”“3”“5”，分别按〈Enter〉键确认，单击 Apply 按钮。

再拾取 1 号面，单击 Apply 按钮，再依次输入“9”“10”“2”“1”，分别按〈Enter〉键确认，单击 Apply 按钮。

再拾取 2 号面，单击 Apply 按钮，再依次输入“11”“12”“4”“3”，分别按〈Enter〉键确认，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Numbering 菜单命令，弹出 Plot Numbering Controls 对话框，将 AREA 项取消选择，NODE 的 Elem/Attrib numbering 项选中 Material numbers，/NUM 项选中 Colors only，单击 OK 按钮。执行 Utility Menu→Plot→Elements 菜单命令，显示建立的有限元模型如图 24-16 所示。

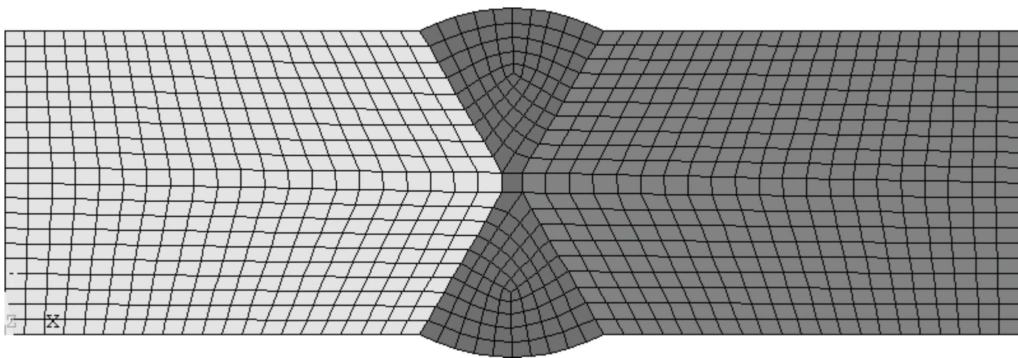


图 24-16　有限元模型

9．合并并压缩图元编号

执行 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Merge Items 菜单命令，弹出 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框，Label 项选中 All，在 SWITCH 项选中 LOWest number，如图 24-17 所示，单击 OK 按钮。

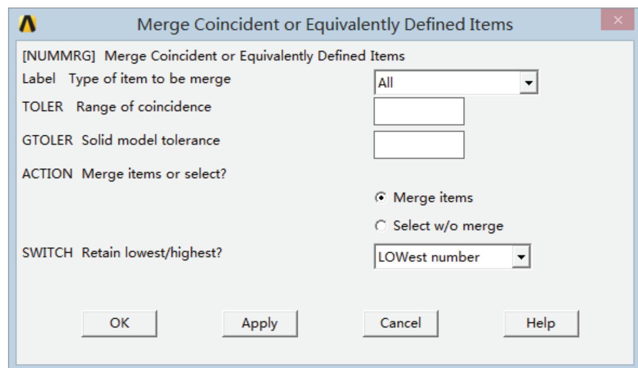


图 24-17 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框

执行 Main Menu→Preprocessor→Numbering Ctrls→Compress Numbers 菜单命令，弹出 Compress Numbers 对话框，Label 项选中 All，如图 24-18 所示，单击 OK 按钮。

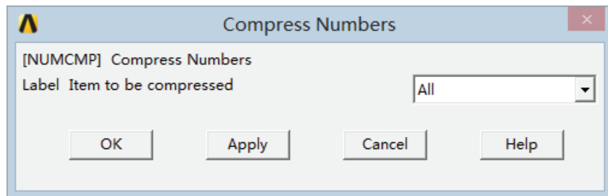


图 24-18 Compress Numbers 对话框

10．定义边界条件

（1）定义左边界固定约束条件。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，Min,Max,Inc 项设为 0，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮，选中模型左边界的所有节点。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，选中所有节点弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，Lab2 项选中 UX，VALUE 项设为 0，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、Y coordinates，Min,Max,Inc 项设为 0，选中 Reselect 单选按钮，单击 OK 按钮，选中模型左边界底端的节点。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Structural→Displacement→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply U,ROT on Nodes 对话框，Lab2 项选中 UY，VALUE 项设为 0，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（2）定义左边界温度值。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，Min,Max,Inc 项设为 0，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮，选中模型左边界的所有节点。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，选中所有节点。弹出 Apply TEMP on Nodes 对话框，Lab2 项选中 TEMP，VALUE 项设为 20，单击 OK 按钮。

（3）定义右边界温度值。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、By Location、X coordinates，Min,Max,Inc 项设为 width，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮，选中模型右边界的所有节点。

执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Thermal→Temperature→On Nodes 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，选中所有节点。弹出 Apply TEMP on Nodes 对话框，Lab2 项选中 TEMP，VALUE 项设为 20，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。边界条件施加完成后的有限元模型如图 24-19 所示。

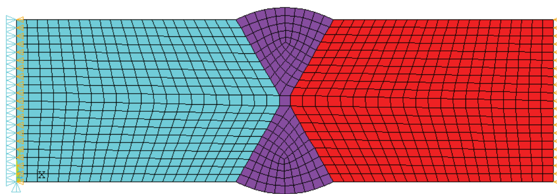


图 24-19 边界条件示意图

11．定义瞬态分析

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Transient 单选按钮，单击 OK 按钮，弹出 Transient Analysis 对话框，取默认设置，单击 OK 按钮。

12．进行焊接过程的模拟

（1）获取模型单元数以及焊缝区单元数。

1）获取模型单元数。执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，依次选中 Model data、For selected set，如图 24-20 所示，单击 OK 按钮，弹出 Get Data for Selected Entity Set 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 emax，Data to be retrieved 项依次选中 Current elem set、Number of elem's，如图 24-21 所示，单击 OK 按钮。

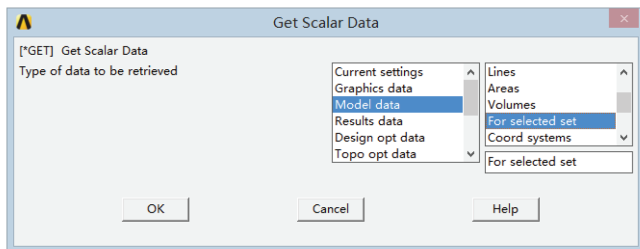


图 24-20 Get Scalar Data 对话框

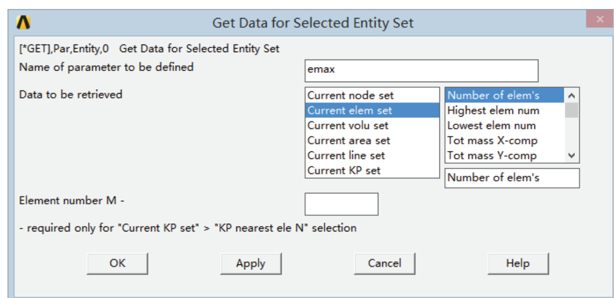


图 24-21 Get Data for Selected Entity Set 对话框

2）获取焊缝区单元数。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Areas、By Attributes、Material num，Min,Max,Inc 项设为 2，选中 From Full 单选按钮，单击 Apply 按钮。继续依次选中 Elements、Attached to、Areas，选中 From Full 单选按钮，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，依次选中 Model data、For selected set，单击 OK 按钮，弹出 Get Data for Selected Entity Set 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 nse，Data to be retrieved 项依次选中 Current elem set、Number of elem's，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（2）定义数组。

1）定义 ne 数组存储焊缝区单元编号，按单元编号大小存储。执行 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit 菜单命令，弹出 Array Parameters 对话框，如图 24-22 所示，单击 Add 按钮，弹出 Add New Array Parameter 对话框，Par 项设为 ne，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 nse，如图 24-23 所示，单击 Apply 按钮。

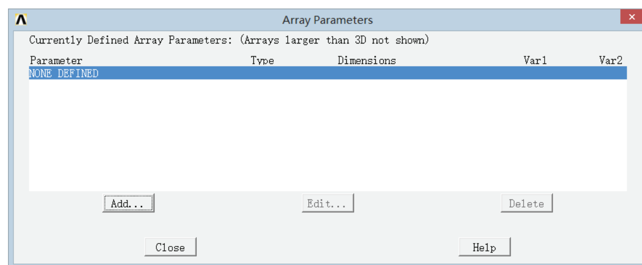


图 24-22 Array Parameters 对话框

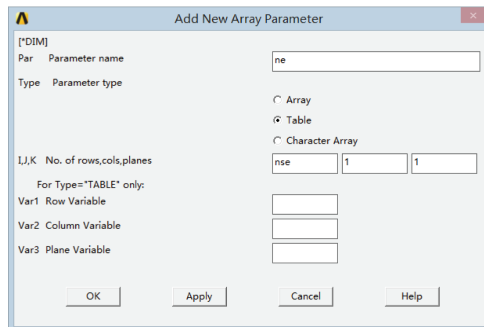


图 24-23 Add New Array Parameter 对话框

2）定义 nex 数组存储焊缝区单元质心 X 坐标，按单元编号大小存储。继续在 Add New Array Parameter 对话框中，将 Par 项设为 nex，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 nse，单击 Apply 按钮。

3）定义 ney 数组存储焊缝区单元质心 Y 坐标，按单元编号大小存储。在 Add New Array Parameter 对话框中，将 Par 项设为 ney，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 nse，单击 Apply 按钮。

4）定义 n1 数组存储上部焊缝区单元编号，按单元编号大小存储。在 Add New Array Parameter 对话框中，将 Par 项设为 n1，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 nse，单击 Apply 按钮。

5）定义 n2 数组存储下部焊缝区单元编号，按单元编号大小存储。在 Add New Array Parameter 对话框中，将 Par 项设为 n2，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 nse，单击 OK 按钮。在 Array Parameters 对话框，单击 Close 按钮。

6）定义 neorder 数组存储所有焊缝区单元编号，按单元质心 X 坐标和 Y 坐标大小存储。在 Add New Array Parameter 对话框中，将 Par 项设为 neorder，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 nse，单击 OK 按钮。

在 Array Parameters 对话框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

（3）对数组赋值。

1）对 ne 数组赋值，用于存储焊缝区单元编号，按单元编号大小存储。

新建立文档 ne，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 ne，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
ii=0
*do,i,1,emax                    ! 对所有的单元进行循环
*if,esel(i),eq,1,then           ! 如果单元被选中，则将其编号放到数组 ne 中
   ii=ii+1                      ! 记录被选中单元的个数
   ne(ii)=i                     ! ne 中存放被选中单元的编号，即焊缝区单元的编号
*endif
*enddo
```

2）对 nex 和 ney 数组赋值，用于存储焊缝区单元编号，按单元编号大小存储。

新建立文档 nexy，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 nexy，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
*do,i,1,nse                        ! 对焊缝区的单元进行循环
*get,ney(i),elem,ne(i),cent,y      ! 取出焊缝区单元质心的 Y 坐标值存入数组 ney 中
*get,nex(i),elem,ne(i),cent,x      ! 取出焊缝区单元质心的 X 坐标值存入数组 nex 中
*enddo
```

3）对 n2 数组赋值，用于存储焊缝区上部单元编号，按单元编号大小存储，并将上部单元数赋予 d。

新建立文档 n2，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 n2，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
d=0
*do,i,1,nse                        ! 对焊缝区的单元进行循环
*if,ney(i),ge,height/2,then        !如果质心 Y 坐标值大于 height/2，则将其编号存入数组 n2 中
```

```
    d=d+1                              ! d 的终值为焊缝区上部分单元的个数
    n2(d)=ne(i)
  *endif
  *enddo
```

4）对 n1 数组赋值，用于存储下部焊缝区单元编号，按单元编号大小存储，并将下部单元数赋予 c。

新建立文档 n1，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 n1，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
c=0
*do,i,1,nse
*if,ney(i),lt,height/2,then           !如果质心 Y 坐标值小于 height/2，则存入数组 n1 中
  c=c+1                               !c 的终值为焊缝区下部分单元的个数
  n1(c)=ne(i)                         !提出焊缝下部分单元，将编号放到数组 n1 中
*endif
*enddo
```

（4）对焊缝区上部单元排序，质心 Y 坐标优先排序，质心 Y 坐标相同则按照质心 X 坐标排序。按照 Y 坐标从小至大、X 坐标从小至大的顺序排序。

1）选中焊缝区上部分单元。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，选中 Elements 单选按钮，单击 Sele None 按钮，如图 24-24 所示，反选所有单元。

新建立文档 n2，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 ns2，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
*do,i,1,d                             !对焊缝区上部单元进行循环
*if,n2(i),ne,0,then
esel,a,elem,,n2(i)                    !选中数组 n2 的单元，即焊缝区上部单元
*endif
*enddo
```

执行 Utility Menu→Plot→Elements 菜单命令，显示焊缝区上部单元，如图 24-25 所示。

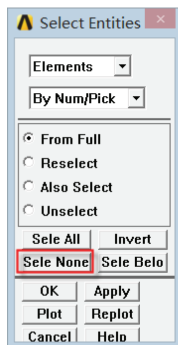


图 24-24　Select Entities 对话框

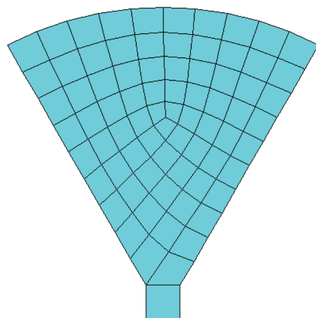


图 24-25　焊缝区上部单元

2）定义数组。执行 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit 菜单命

令，弹出 Array Parameters 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Add New Array Parameter 对话框，Par 项设为 ne2，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 d，单击 Apply 按钮。

在 Add New Array Parameter 对话框中，Par 项设为 nex2，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 d，单击 Apply 按钮。

在 Add New Array Parameter 对话框中，Par 项设为 ney2，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 d，单击 OK 按钮。

在 Array Parameters 对话框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

3）对各数组赋值，并按照单元质心 Y 坐标和质心 X 坐标的大小将单元排序，存入数组 neorder。新建立文档 neorder2，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 neorder2，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
mine=0
*do,i1,1,d                              !焊缝区上部分的单元进行循环
*get,nse2,elem,,count                   !取出所选单元的个数 nse2
!===确定选中的单元，并存入数组 ne2====
ii=0
*do,i,1,emax
  *if,esel(i),eq,1,then                 !如果单元被选中，则将其编号放到数组 ne2 中
    ii=ii+1                             !确定选中的单元个数
    ne2(ii)=i                           !并将其编号存入数组 ne2 中
  *endif
*enddo
!===将选中单元的 Y 坐标和 X 坐标分别赋予数组 ney2 和 nex2====
*do,i,1,nse2
  *get,ney2(i),elem,ne2(i),cent,y       !选中单元的质心 Y 坐标值存放到数组 ney2 中
  *get,nex2(i),elem,ne2(i),cent,x       !选中单元的质心 X 坐标值存放到数组 nex2 中
*enddo
!====通过单元质心 Y 坐标和 X 坐标的比较，确定在所选定单元组内，==========
!======== 单元质心 Y 坐标和 X 坐标最小的单元==========
miny=1e20                             !给中间变量赋一个非常大的值
minx=1e20                             !给中间变量赋一个非常大的值
*do,i,1,nse2
  *if,ney2(i),lt,miny,then            !对单元质心 Y 坐标值进行比较，
   miny=ney2(i)                       !如果单元质心 Y 坐标小于 miny，
   minx=nex2(i)                       !则将中间变量 miny 和 minx 均赋新值，
   mine=ne2(i)                        !并将该单元编号赋予 mine
  *else
  *if,ney2(i),eq,miny,then            !对单元质心 Y 坐标值进行比较，如果相等，
  *if,nex2(i),lt,minx,then            !对单元质心 X 坐标值进行比较，
   miny=ney2(i)                       !如果单元质心 X 坐标小于 minx，
   minx=nex2(i)                       !则将中间变量 miny 和 minx 均赋新值，
   mine=ne2(i)                        !并将该单元编号赋予 mine
  *endif
```

```
  *endif
  *endif
*enddo
!================反选单元质心Y坐标和X坐标最小的单元=================
esel,u,elem,,mine                    !反选单元质心 Y 坐标和 X 坐标最小的单元
neorder(i1)=mine !焊缝区选定单元质心坐标最小的单元编号赋予 neorder 数组
*enddo
```

（5）对焊缝区下部单元排序，质心 Y 坐标优先排序，质心 Y 坐标相同则按照质心 X 坐标排序。按照 Y 坐标从大至小、X 坐标从大至小的顺序排序。

1）选中焊缝区下部分单元。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，选中 Elements 单选按钮，单击 Sele None 按钮，反选所有单元。

新建立文档 n1，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 n1，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
*do,j,1,c                              !对焊缝区下部单元进行循环
*if,n1(j),ne,0,then
esel,a,elem,,n1(j)                      !选中焊缝区下部单元
*endif
*enddo
```

执行 Utility Menu→Plot→Elements 菜单命令，显示焊缝区下部单元如图 24-26 所示。

2）定义数组。执行 Utility Menu→Parameters→Array Parameters→Define/Edit 菜单命令，弹出 Array Parameters 对话框，单击 Add 按钮，弹出 Add New Array Parameter 对话框，Par 项设为 ne1，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 c，单击 Apply 按钮。

在 Add New Array Parameter 对话框中，Par 项设为 nex1，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 c，单击 Apply 按钮。

在 Add New Array Parameter 对话框中，Par 项设为 ney1，Type 项选中 Table，I，J，K 项设为 c，单击 OK 按钮。

在 Array Parameters 对话框，单击 Close 按钮关闭该对话框。

3）对各数组赋值，并按照单元质心 Y 坐标和质心 X 坐标的大小将单元排序，存入数组 neorder。

新建立文档 neorder1，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 neorder1，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
maxe=0
*do,j1,1,c                                  ! 焊缝区上部分的单元进行循环
*get,nse1,elem,,count                        ! 取出所选单元的个数 nse1
!================确定选中的单元，并存入数组 ne1=====================
jj=0
*do,j,1,emax
  *if,esel(j),eq,1,then                     !如果单元被选中，则将其编号放到数组 ne1 中
    jj=jj+1                                 !确定选中的单元个数
    ne1(jj)=j                               !并将其编号存入数组 ne1 中
```

```
  *endif
*enddo
!==========将选中单元的Y坐标和X坐标分别赋予数组ney1和nex1==============
*do,j,1,nse1
   *get,ney1(j),elem,ne1(j),cent,y           !选中单元的质心 Y 坐标值存放到数组 ney1 中
   *get,nex1(j),elem,ne1(j),cent,x           !选中单元的质心 X 坐标值存放到数组 nex1 中
*enddo
!========通过单元质心Y坐标和X坐标的比较，确定在所选定单元组内，==========
!=================单元质心Y坐标和X坐标最大的单元=====================
maxy=-1e10                          !给中间变量赋一个非常小的值
maxx=-1e10                          !给中间变量赋一个非常小的值
*do,j,1,nse1
  *if,ney1(j),gt,maxy,then          !对单元质心 Y 坐标值进行比较，
maxy=ney1(j)                        !如果单元质心 Y 坐标大于 maxy，
maxx=nex1(j)                        !则将中间变量 maxy 和 maxx 均赋新值，
maxe=ne1(j)                         !并将该单元编号赋予 maxe
  *else
  *if,ney1(j),eq,maxy,then          !对单元质心 Y 坐标值进行比较，如果相等，
  *if,nex1(j),gt,maxx,then          !对单元质心 X 坐标值进行比较，
maxy=ney1(j)                        !如果单元质心 X 坐标大于 maxx，
maxx=nex1(j)                        !则将中间变量 maxy 和 maxx 均赋新值，
maxe=ne1(j)                         !并将该单元编号赋予 maxe
  *endif
  *endif
  *endif
*enddo
!=================反选单元质心Y坐标和X坐标最大的单元===================
esel,u,elem,,maxe          ! 反选单元质心 Y 坐标和 X 坐标最大的单元
neorder(j1+d)=maxe!焊缝区选定单元质心坐标最小的单元编号赋予 neorder 数组
*enddo
```

（6）设置求解控制，并进行求解。

1）输入求解时间控制参数。在输入窗口输入以下参数：

```
max_tem=1500                    ! 指定焊缝区的初始温度
delt=1e-3                       ! 定义时间步长增量
dt=5                            ! 定义每次焊接所需要的时间
t=0                             ! 初始化焊接时间
```

2）通过循环方式杀死焊缝单元，显示单元杀死过程。执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型，执行 Utility Menu→Plot→Elements 菜单命令，显示单元。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→View Settings→Automatic Fit Mode 菜单命令，弹出 Automatic Fit Mode 对话框，WN 项选中 Window 1，选中 Enabled 单选按钮，如图 24-27 所示，单击 OK 按钮。

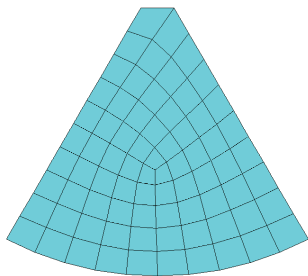


图 24-26　焊缝下部单元

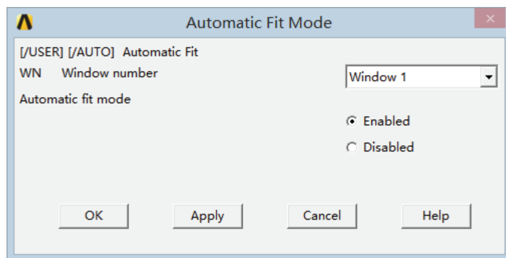


图 24-27　Automatic Fit Mode 对话框

3）杀死焊缝单元。新建立文档 elekill，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 elekill，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
*do,i,1,nse                    !动画显示单元的杀死过程
ekill,neorder(i)               !按单元排列的顺序杀死单元
esel,s,live                    !选择没有杀死的单元
eplot                          !显示单元
*enddo
```

执行过程中，可以查看到单元杀死全过程。

4）施加初始温度。执行 Main Menu→Solution→Define Loads→Apply→Initial Condit'n→Define 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Define Initial Conditions 对话框，Lab 项选中 TEMP，VALUE 项设为 20，单击 OK 按钮。

5）输出控制。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Analysis Type→Sol'n Controls→Basic 菜单命令，弹出 Solution Controls 对话框，选中 Basic 标签，Frequency 项选中 Write every substep，单击 OK 按钮。

6）设置瞬态控制。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Load Step Opts→Time/Frequenc→Time Integration→Amplitude Decay 菜单命令，弹出 Time Integration Controls 对话框，取消 For structural DOFs 和 For magnetic DOFs 的选择，选中 For thermal DOFs，如图 24-28 所示，单击 OK 按钮。

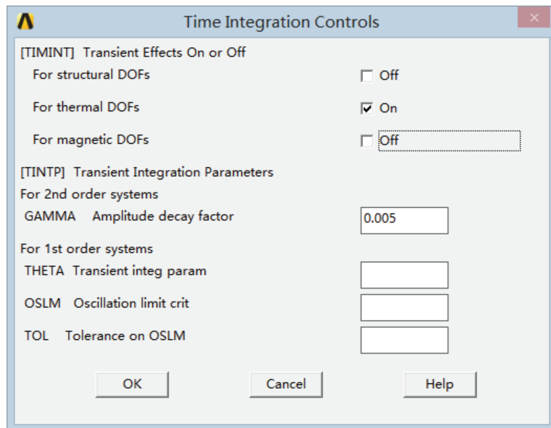


图 24-28　Time Integration Controls 对话框

7）依次激活各个焊缝单元并进行计算。新建立文档 calcu，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令，读取 calcu，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。

```
nsub1=2                                   !焊缝单元相变过程中子步数
nsub2=40                                  !焊缝单元冷却过程中子步数
*do,i,1,nse                               !对焊缝区单元进行循环分析
/solu
NEQIT, 1000                               !设置平衡迭代步数
ealive,neorder(i)                         !按单元排序顺序激活单元
esel,s,live                               !选择没有杀死的单元
eplot
esel,all                                  !选择所有单元
t=t+delt
time,t                                    !指定载荷步的结束时间
nsubst,1                                  !指定子步数
*do,j,1,4
    d,nelem(neorder(i),j),temp,max_tem    !给激活单元的节点施加温度约束
*enddo
solve                                     !求解
t=t+delt
time,t                                    !指定载荷步的结束时间
solve                                     !求解
*do,j,1,4
ddele,nelem(neorder(i),j),temp            !删除激活单元节点上的温度约束
*enddo
t=t+dt-2*delt
time,t                                    !指定载荷步的结束时间
nsubst,nsub1                              !指定子步数
solve                                     !求解
*enddo                                    !焊缝区单元循环分析结束
t=t+50000                                 !指定一个温度冷却的时间
time,t                                    !设置载荷步结束的时间
nsubst,nsub2                              !指定子步数
solve                                     !最后一次求解
finish
```

13．取焊接件及焊缝材料处各一个节点，查看温度随时间的变化曲线图

执行 Main Menu→TimeHistPostpro 菜单命令，弹出 Time History Variable 对话框。或者关闭之后，执行 Main Menu→TimeHistPostpro→Variable Viewer 菜单命令，打开该对话框。

单击⊞按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，执行 Nodal Solution→DOF Solution→Nodal Temperature 菜单命令，单击 OK 按钮，弹出节点拾取对话框，输入“52”，单击 OK 按钮，建立变量 TEMP_2。重复以上操作，输入“582”，建立变量 TEMP_3。节点

52 和节点 582 的位置如图 24-29 所示。

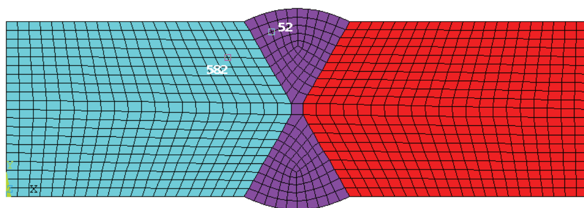


图 24-29　节点 52 和节点 582 的位置示意图

完成以上操作后，在 Time History Variable 对话框中选择 TEMP_2，单击图标，绘制焊缝一个节点温度随时间的变化曲线，如图 24-30 所示。选择 TEMP_3，单击图标，绘制焊缝一个节点温度随时间的变化曲线，如图 24-31 所示。

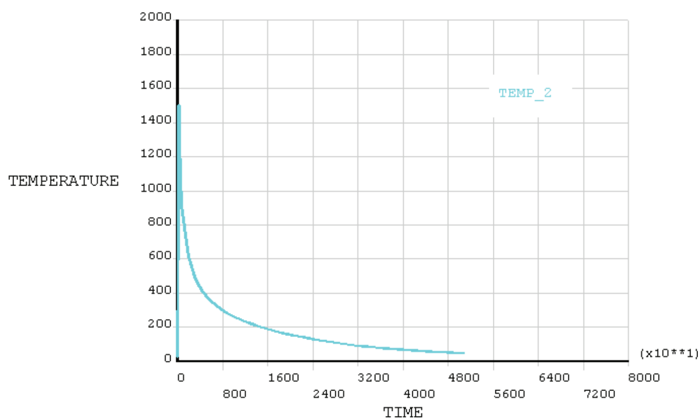


图 24-30　节点 52 温度随时间变化曲线图

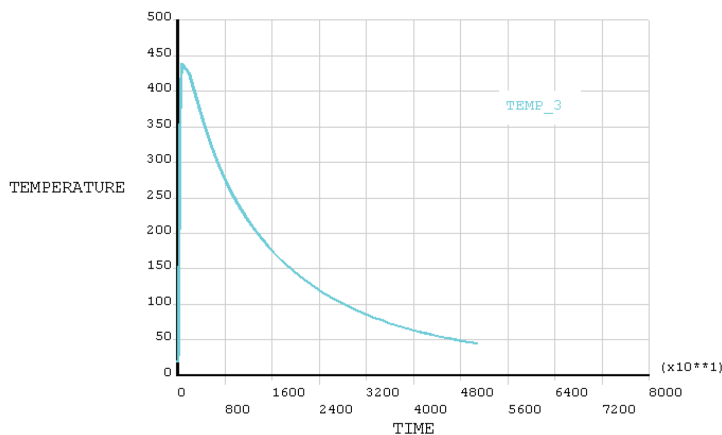


图 24-31　节点 582 温度随时间变化曲线图

14．生成节点 Von Mises 当量应力云图动画文件

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Redirect Plots→Delete Segments 菜单命令，删除当前内存段中所有的数据。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Displacement Scaling 菜单命令，弹出 Displacement Display Scaling 对话框，WN 项选中 Window 1，DMULT 项选中 1.0（true scale），单击 OK 按钮。

执行 Main Menu→General Postproc→Options for Outp 菜单命令，弹出 Options for Output 对话框，AVPRIN 项选中 From components，AVRES 项选中 All data，如图 24-32 所示，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Redirect Plots→To Segment Memory 菜单命令，弹出 Redirect Plots to Animation File(NT Specific)对话框，选中 Store multiple 单选按钮，AVINAM 项设为 von mises file，DELAY 项设为 0.1，如图 24-33 所示，单击 OK 按钮，存储计算结果到 von mises file 文件。

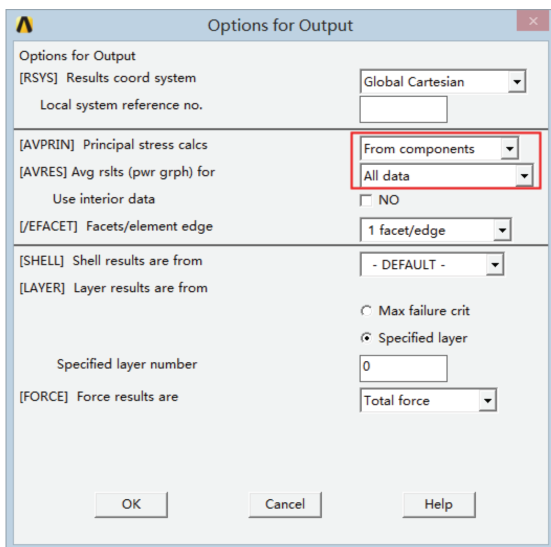


图 24-32 Options for Output 对话框

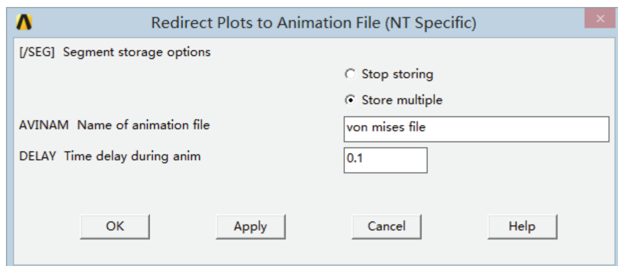


图 24-33 Redirect Plots to Animation File(NT Specific)对话框

新建立文档 mises，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input

from 菜单命令，读取 mises，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。将焊接过程中激活每个焊缝单元时各个载荷步和子步的应力分布云图都存储到 von mises file 中。

```
*do,i,1,nse                           ！焊缝区的单元进行循环
esel,u,elem,,neorder(i)               ！按单元排序的顺序反选单元
*enddo                                ！反选掉所有焊缝单元
*do,i,1,nse
esel,a,elem,,neorder(i)               ！按单元排序的顺序再选单元
set,(i-1)*3+1,1                       ！读入指定载荷步第一个子步的结果
plnsol,s,eqv                          ！显示节点的 Von Mises 应力云图
*do,j,1,nsub1
    set,(i-1)*3+3,j                   ！读入指定载荷步中的子步结果
plnsol,s,eqv                          ！显示节点的 Von Mises 应力云图
*enddo
*enddo
*do,i,1,nsub2                         ！对冷却时间的子步进行循环
set,(nse-1)*3+4,i                     ！读入指定载荷步中的子步结果
plnsol,s,eqv                          ！显示节点的 Von Mises 应力云图
*enddo
```

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Redirect Plots→To Segment Memory 菜单命令，弹出 Redirect Plots to Animation File(NT Specific)对话框，选中 Stop storing 单选按钮，AVINAM 项选中 von mises file，DELAY 项选中 0.1，单击 OK 按钮，结束计算结果到 von mises file 文件的存储。在目录文件下即产生了 vonmisesfile.avi 动画文件。

在输入窗口输入“anim,1,1”，按〈Enter〉键执行；或执行 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Restore Animation 菜单命令，弹出 Restore Animation 对话框，单击 Browse 按钮，打开 vonmisesfile.avi 文件，如图 24-34 所示，单击 OK 按钮，即可以查看在焊接过程中节点 Von Mises 当量应力云图的变化过程。

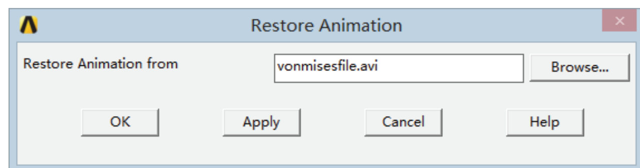


图 24-34 Restore Animation 对话框

15．生成节点温度分布云图动画文件

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Redirect Plots→Delete Segments 菜单命令，删除当前内存段中所有的数据。

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Style→Displacement Scaling 菜单命令，弹出 Displacement Display Scaling 对话框，WN 项选中 Window 1，DMULT 项选中 1.0（true scale）单选按钮，单击 OK 按钮。

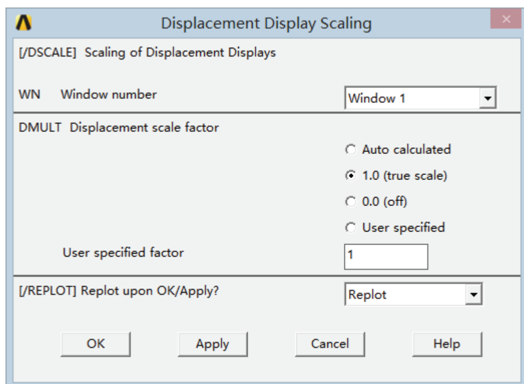


图 24-35 Displacement Display Scaling 对话框

执行 Main Menu→General Postproc→Options for Output 菜单命令，弹出 Options for Output 对话框，如图 24-36 所示，AVPRIN 项选中 From components，AVRES 项选中 All data，单击 OK 按钮。

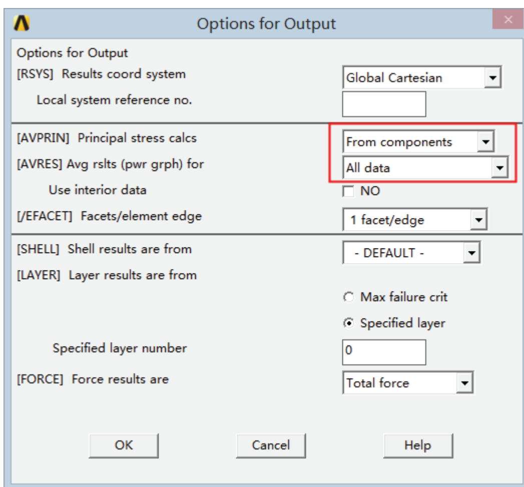


图 24-36 Options for Output 对话框

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Redirect Plots→To Segment Memory 菜单命令，弹出 Redirect Plots to Animation File(NT Specific)对话框，选中 Store multiple 单选按钮，AVINAM 项设为 temp file，DELAY 项设为 0.1，如图 24-37 所示，单击 OK 按钮。存储计算结果到 temp file 文件。

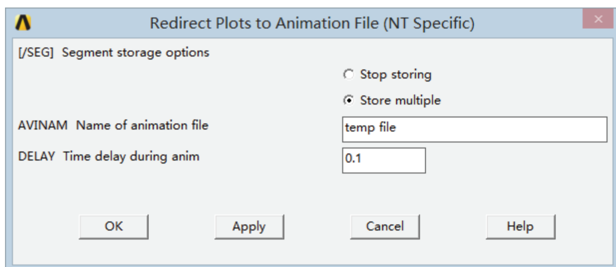


图 24-37 Redirect Plots to Animation File(NT Specific)对话框

新建立文档 temperature，输入以下 APDL 语言。直接执行 Utility Menu→File→Read Input from 菜单命令读取 temperature，或者直接复制该 APDL 语言，粘贴到输入框，按〈Enter〉键执行。将焊接过程中激活每个焊缝单元时各个载荷步和子步的温度分布云图都存储到 temp file 中。

```
*do,i,1,nse                              ！焊缝区的单元进行循环
esel,u,elem,,neorder(i)                  ！按单元排序的顺序反选单元
*enddo                                   ！反选掉所有焊缝单元
*do,i,1,nse
esel,a,elem,,neorder(i)                  ！按单元排序的顺序再选单元
set,(i-1)*3+1,1                          ！读入指定载荷步第一个子步的结果
plnsol,temp                              ！显示节点的温度云图
*do,j,1,nsub1
   set,(i-1)*3+3,j                       ！读入指定载荷步中的子步结果
plnsol,temp                              ！显示节点的温度云图
*enddo
*enddo
*do,i,1,nsub2                            ！对冷却时间的子步进行循环
set,(nse-1)*3+4,i                        ！读入指定载荷步中的子步结果
plnsol,temp                              ！显示节点的温度云图
*enddo
/seg,off,temp,0.1                        ！关闭内存段的存入
anim,1,1                                 ！查看动画
```

执行 Utility Menu→PlotCtrls→Redirect Plots→To Segment Memory 菜单命令，弹出 Redirect Plots to Animation File(NT Specific)对话框，选中 Stop Storing 单选按钮，AVINAM 项设为 temp file， DELAY 项设为 0.1，如图 24-38 所示，单击 OK 按钮。结束计算结果到 von mises file 文件的存储。

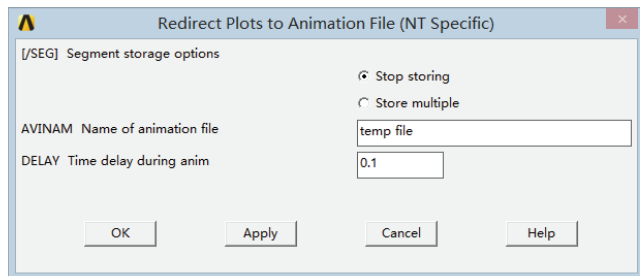


图 24-38 Redirect Plots to Animation File(NT Specific)对话框

在输入窗口输入“anim,1,1“，按〈Enter〉键执行；或执行 Utility Menu→PlotCtrls→Animate→Restore Animation 菜单命令，弹出 Restore Animation 对话框，单击 Browse 按钮，打开 tempfile.avi 文件，单击 OK 按钮，即可以查看在焊接过程中节点温度分布云图的变化过程。

16．显示温度分布云图

1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

2）执行 Main Menu→General Postproc→Read Results→Last Set 菜单命令，读取最后一个子步的计算结果。

3）执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。Nodal Solution 项选中 Nodal Temperature，单击 OK 按钮。所得温度分布如图 24-39 所示。

17．显示等效应力分布云图

执行 Main Menu→General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框。Nodal Solution 项选中 Stress 和 von Mises Stress，单击 OK 按钮。所得等效应力分布如图 24-40 所示。

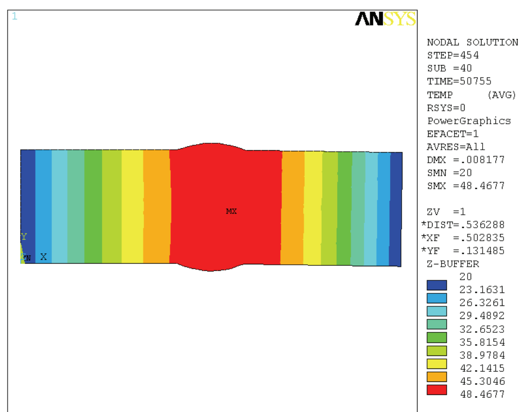


图 24-39　最后子步温度分布云图

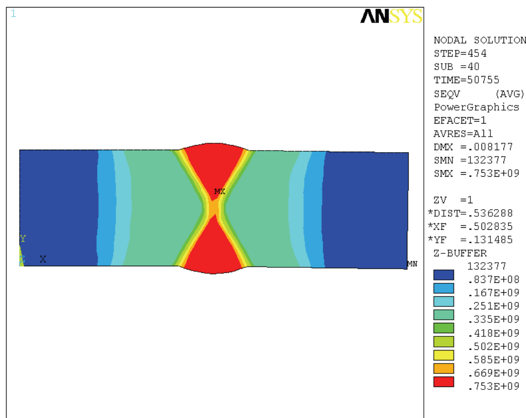


图 24-40　最后子步等效应力分布云图

18．退出 ANSYS

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Quit-No Save，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。

24.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise24                    !*****************************************************
*******************
!**************************定义单元及材料属性*****************************
/PREP7                                         !进入前处理器
et,1,13,4                                      !选择单元类型并定义单元自由度
et,2,13,4                                      !选择单元类型并定义单元自由度
mptemp,1,20,500,800,1200,1500                  !定义温度数组
mpdata,ex,1,1,2.09e11,1.72e11,1.33e11,0.84e11,0.45e11     !定义钢材 1 的弹性模量
mpdata,ex,2,1,2.16e11,1.78e11,1.42e11,1.04e11,0.68e11     !定义钢材 2 的弹性模量
```



```
mpdata,ex,3,1,2.12e11,1.75e11,1.39e11,1.07e11,0.83e11        !定义钢材 3 的弹性模量
!经典双线性随动强化参数（钢材 1）
tb,bkin,1,5
tbtemp,20,1
tbdata,1,315e6,0.209e11
tbtemp,500,2
tbdata,1,212e6,0.172e11
tbtemp,800,3
tbdata,1,153e6,0.133e11
tbtemp,1200,4
tbdata,1,93e6,0.084e11
tbtemp,1500,5
tbdata,1,33e6,0.045e11
!经典双线性随动强化参数（钢材 2）
tb,bkin,2,5
tbtemp,20,1
tbdata,1,314e6,0.216e11
tbtemp,500,2
tbdata,1,203e6,0.178e11
tbtemp,800,3
tbdata,1,153e6,0.142e11
tbtemp,1200,4
tbdata,1,63e6,0.104e11
tbtemp,1500,5
tbdata,1,13e6,0.068e11
!经典双线性随动强化参数（材料 3）
tb,bkin,3,5
tbtemp,20,1
tbdata,1,330e6,0.212e11
tbtemp,500,2
tbdata,1,213e6,0.175e11
tbtemp,800,3
tbdata,1,153e6,0.139e11
tbtemp,1200,4
tbdata,1,73e6,0.107e11
tbtemp,1500,5
tbdata,1,13e6,0.083e11
mp,dens,1,7850                !定义钢材 1 密度
mp,dens,2,7770                !定义钢材 2 密度
mp,dens,3,7860                !定义钢材 3 密度
mp,alpx,1,1.23e-5             !定义钢材 1 热膨胀系数
mp,alpx,2,1.38e-5             !定义钢材 2 热膨胀系数
mp,alpx,3,1.48e-5             !定义钢材 3 热膨胀系数
```

```
mp,nuxy,1,0.30                    !定义钢材 1 泊松比
mp,nuxy,2,0.29                    !定义钢材 2 泊松比
mp,nuxy,3,0.29                    !定义钢材 3 泊松比
mp,kxx,1,33                       !定义钢材 1 导热系数
mp,kxx,2,32                       !定义钢材 2 导热系数
mp,kxx,3,34                       !定义钢材 3 导热系数
mp,c,1,561                        !定义钢材 1 比热容
mp,c,2,683                        !定义钢材 2 比热容
mp,c,3,983                        !定义钢材 3 比热容
mp,murx,1,1                       !定义钢材 1 磁场相对渗透系数
mp,murx,2,1                       !定义钢材 2 磁场相对渗透系数
mp,murx,3,1                       !定义钢材 3 磁场相对渗透系数
mp,reft,1,20                      !定义钢材 1 参考温度
mp,reft,2,1500                    !定义钢材 2 参考温度
mp,reft,3,20                      !定义钢材 3 参考温度
!*************************************************************************
!***************************以下建立分析模型和网格*************************
*afun,deg                          !选择使用的角度单位制
csys,0                                    !选择坐标系
width=1
height=0.3
ar=0.14*tan(30)
ex=0.01*tan(60)
df=ar+ex
cf=df/cos(60)                             !定义参数
k,1,                                      !建立底面关键点
k,2,width/2-0.01-ar,0,0
k,3,width/2+0.01+ar,0,0
k,4,width,0,0
k,5,width/2-0.01,height/2-0.01,0          !建立焊缝中间区域关键点
k,6,width/2+0.01,height/2-0.01,0
k,7,width/2-0.01,height/2+0.01,0
k,8,width/2+0.01,height/2+0.01,0
k,9,0,height,0                            !建立顶部关键点
k,10,width/2-0.01-ar,height,0
k,11,width/2+0.01+ar,height,0
k,12,width,height,0
larc,10,11,7,cf                           ! 生成焊缝区的两条圆弧线
larc,2,3,5,cf
a,1,2,5,7,10,9                            ! 由关键点生成面即母材区的左面
a,3,4,12,11,8,6                           ! 生成母材区的右面
a,2,3,6,5                                 ! 生成焊缝区
a,5,6,8,7                                 ! 生成焊缝区
```



```
a,7,8,11,10                          ！生成焊缝区
allsel,all                           ！选中所有模型
asel,s,,,1
aatt,1,,1                            ！定义左侧焊件材料和单元属性
asel,s,,,2
aatt,3,,1                            ！定义右侧焊件材料和单元属性
asel,s,,,3,5,1
aatt,2,,2                            ！定义中间焊缝材料和单元属性
allsel,all
esize,0.02                           ！定义网格尺寸
AMAP,4,7,8,6,5                       ！划分网格
AMAP,5,10,11,8,
AMAP,3,2,3,5,
AMAP,1,9,10,2,1
AMAP,2,11,12,4,3
nummrg,all,,,,low                    ！合并所有实体
numcmp,all                           ！压缩编号
eplot
finish
!****************************************************************************
!*****************************施加约束**************************************
/solu
antype,4                             ！指定分析类型为瞬态分析
trnopt,full                          ！指定瞬态分析的求解方法为完全法
nsel,all                             ！选中所有节点
nsel,s,loc,x,0                       ！选中模型左端节点
d,all,ux,0                           ！给选择的节点施加 X 向约束
nsel,r,loc,y,0                       ！选择模型左端的底端节点
d,all,uy,0                           ！给选择的节点施加 Y 向约束
allsel,all                           ！选中所有模型
nsel,s,loc,x,0                       ！选中模型左端节点
d,all,temp,20                        ！给 X＝MINX 节点施加温度约束
nsel,s,loc,x,width                   ！选中模型右端节点
d,all,temp,20                        ！给 X＝MAXX 的节点施加温度约束
allsel,all                           ！选中所有模型
                                     !***分别提取焊缝区域、焊缝上部分和焊缝下部分单元并
                                      储存到数组 ne、n1 和 n2 中****
*get,emax,elem,,count                ！取出单元的最大编号 emax
asel,s,mat,,2                        ！选择编号为 2 的面即焊缝区
esla                                 ！选择焊缝区的所有单元
*get,nse,elem,,count                 ！取出焊缝区单元的个数 nse
*dim,ne,,nse                         ！定义储存焊缝区单元编号的数组
*dim,nex,,nse                        !定义储存焊缝区单元质心 X 坐标的数组
```

```
*dim,ney,,nse                       !定义储存焊缝区单元质心Y坐标的数组
*dim,n1,,nse                        !定义储存上部焊缝区单元编号的数组
*dim,n2,,nse                        !定义储存下部焊缝区单元编号的数组
*dim,neorder,,nse                   !定义储存所有焊缝区单元编号的数组
ii=0
*do,i,1,emax                        !对所有的单元进行循环
*if,esel(i),eq,1,then               !如果单元被选中，则将其编号放到数组ne中
   ii=ii+1                          !记录被选中单元的个数
   ne(ii)=i                         !ne中存放被选中单元的编号，即焊缝区单元的编号
*endif
*enddo.
*do,i,1,nse                         !对焊缝区的单元进行循环
*get,ney(i),elem,ne(i),cent,y       !取出焊缝区单元质心的Y坐标值存入数组ney中
*get,nex(i),elem,ne(i),cent,x       !取出焊缝区单元质心的X坐标值存入数组nex中
*enddo
d=0
*do,i,1,nse                         !对焊缝区的单元进行循环
*if,ney(i),ge,height/2,then         !如果质心Y坐标值大于height/2，则将其编号存入数组
                                     n2中
   d=d+1                            !d的终值为焊缝区上部分单元的个数
   n2(d)=ne(i)                      !提出焊缝上部分单元，将编号放到数组n2中
*endif
*enddo
c=0
*do,i,1,nse
*if,ney(i),lt,height/2,then         !如果质心Y坐标值小于height/2，则存入数组n1中
   c=c+1                            !c的终值为焊缝区下部分单元的个数
   n1(c)=ne(i)                      !提出焊缝下部分单元，将编号放到数组n1中
*endif
*enddo
!***************对焊缝区上部分的单元按质心Y坐标进行排序******************
esel,none                           !不选择任何单元
!选中上部分单元
*do,i,1,d                           !对焊缝区上部单元进行循环
*if,n2(i),ne,0,then
esel,a,elem,,n2(i)                  !选中数组n2的单元，即焊缝区上部单元
*endif
*enddo
eplot                               ! 显示焊缝区上部分的单元
*dim,ne2,,d                         !定义存储焊缝区上部分单元编号的数组
*dim,nex2,,d                        !定义存储焊缝区上部分单元质心X坐标的数组
*dim,ney2,,d                        !定义储存焊缝区上部分单元质心Y坐标的数组、
mine=0
```



```
*do,i1,1,d                                   !焊缝区上部分的单元进行循环
*get,nse2,elem,,count                        !取出所选单元的个数 nse2
!==================确定选中的单元，并存入数组 ne2========================
ii=0
*do,i,1,emax
  *if,esel(i),eq,1,then                      !如果单元被选中，则将其编号放到数组 ne2 中
    ii=ii+1                                  !确定选中的单元个数
    ne2(ii)=i                                !并将其编号存入数组 ne2 中
  *endif
*enddo
!========将选中单元的 Y 坐标和 X 坐标分别赋予数组 ney2 和 nex2============
*do,i,1,nse2
  *get,ney2(i),elem,ne2(i),cent,y            !选中单元的质心 Y 坐标值存放到数组 ney2 中
  *get,nex2(i),elem,ne2(i),cent,x            !选中单元的质心 X 坐标值存放到数组 nex2 中
*enddo
!========通过单元质心 Y 坐标和 X 坐标的比较，确定在所选定单元组内，==========
!==============单元质心 Y 坐标和 X 坐标最小的单元=====================
miny=1e20                                    !给中间变量赋一个非常大的值
minx=1e20                                    !给中间变量赋一个非常大的值
*do,i,1,nse2
  *if,ney2(i),lt,miny,then                   !对单元质心 Y 坐标值进行比较，
   miny=ney2(i)                              !如果单元质心 Y 坐标小于 miny，
   minx=nex2(i)                              !则将中间变量 miny 和 minx 均赋新值，
   mine=ne2(i)                               !并将该单元编号赋予 mine
  *else
  *if,ney2(i),eq,miny,then                   !对单元质心 Y 坐标值进行比较，如果相等，
  *if,nex2(i),lt,minx,then                   !对单元质心 X 坐标值进行比较，
   miny=ney2(i)                              !如果单元质心 X 坐标小于 minx，
   minx=nex2(i)                              !则将中间变量 miny 和 minx 均赋新值，
   mine=ne2(i)                    !并将该单元编号赋予 mine
  *endif
  *endif
  *endif
*enddo
!==============反选单元质心 Y 坐标和 X 坐标最小的单元================
esel,u,elem,,mine                 !反选单元质心 Y 坐标和 X 坐标最小的单元
neorder(i1)=mine
                                  !焊缝区选定单元质心 Y 坐标和 X 坐标最小的单元编号赋予
                                   neorder 数组
*enddo
                                  !****对焊缝区下部分的单元按质心 Y 坐标进行排序，与其上部分
                                   的过程相类似*******
esel,none
```

```
*do,j,1,c                                !对焊缝区下部单元进行循环
*if,n1(j),ne,0,then
esel,a,elem,,n1(j)                       !选中焊缝区下部单元
*endif
*enddo
eplot
*dim,ne1,,c                              !定义存储焊缝区下部分单元编号的数组
*dim,nex1,,c                             !定义存储焊缝区下部分单元质心 X 坐标的数组
*dim,ney1,,c                             !定义存储焊缝区下部分单元质心 Y 坐标的数组
maxe=0
*do,j1,1,c                               ！ 焊缝区上部分的单元进行循环
*get,nse1,elem,,count                    ！ 取出所选单元的个数 nse1
!================确定选中的单元，并存入数组 ne1====================
jj=0
*do,j,1,emax
*if,esel(j),eq,1,then                    !如果单元被选中，则将其编号放到数组 ne1 中
      jj=jj+1                            !确定选中的单元个数
      ne1(jj)=j                          !并将其编号存入数组 ne1 中
   *endif
*enddo
!==========将选中单元的 Y 坐标和 X 坐标分别赋予数组 ney2 和 nex2============
*do,j,1,nse1
    *get,ney1(j),elem,ne1(j),cent,y      !选中单元的质心 Y 坐标值存放到数组 ney1 中
    *get,nex1(j),elem,ne1(j),cent,x      !选中单元的质心 X 坐标值存放到数组 nex1 中
*enddo
!=======通过单元质心 Y 坐标和 X 坐标的比较，确定在所选定单元组内，=========
!============单元质心 Y 坐标和 X 坐标最大的单元================
maxy=-1e10                               !给中间变量赋一个非常小的值
maxx=-1e10                               !给中间变量赋一个非常小的值
*do,j,1,nse1
   *if,ney1(j),gt,maxy,then              !对单元质心 Y 坐标值进行比较，
maxy=ney1(j)                             !如果单元质心 Y 坐标大于 miny，
maxx=nex1(j)                             !则将中间变量 miny 和 minx 均赋新值，
maxe=ne1(j)                              !并将该单元编号赋予 mine
   *else
   *if,ney1(j),eq,maxy,then              !对单元质心 Y 坐标值进行比较，如果相等，
   *if,nex1(j),gt,maxx,then              !对单元质心 X 坐标值进行比较，
maxy=ney1(j)                             !如果单元质心 X 坐标大于 minx，
maxx=nex1(j)                             !则将中间变量 miny 和 minx 均赋新值，
maxe=ne1(j)                              !并将该单元编号赋予 mine
   *endif
   *endif
   *endif
```



```
*enddo
!═══════════反选单元质心Y坐标和X坐标最大的单元═══════════
esel,u,elem,,maxe                        ! 反选单元质心 Y 坐标和 X 坐标最大的单元
neorder(j1+d)=maxe!焊缝区选定单元质心最小的单元编号赋予 neorder 数组
*enddo
!**************************************************************************
!****************************进行求解计算***********************************
max_tem=1500                             !指定焊缝区的初始温度
delt=1e-3                                !定义时间步长增量
dt=5                                     !定义每次焊接所需要的时间
t=0                                      !初始化焊接时间
esel,all
eplot
/auto,1                                  !自动确定图形的显示为最佳状态
/replot
*do,i,1,nse                              !动画显示单元的杀死过程
ekill,neorder(i)                         !按单元排列的顺序杀死单元
esel,s,live                              !选择没有杀死的单元
eplot                                    !显示单元
*enddo
alls                                     !选择所有实体
outres,all,all                           !输出控制，即所有子步的所有内容均输出到文件
ic,all,temp,20                           !施加初始温度为 20 度
kbc,1                                    !阶跃载荷变化
timint,0,struct                          !关闭结构的瞬态响应
timint,0,mag                             !关闭磁的瞬态响应
timint,1,therm                           !施加热的瞬态响应
tintp,0.005,,,1,0.5,0.2                  !设置瞬态积分参数
!═══════════依次激活各个焊缝单元并进行计算═══════════
nsub1=2                                  !焊缝单元相变过程中子步数
nsub2=40                                 !焊缝单元冷却过程中子步数
*do,i,1,nse                              !对焊缝区单元进行循环分析
/solu
NEQIT, 1000                              !设置平衡迭代步数
ealive,neorder(i)                        !按单元排序顺序激活单元
esel,s,live                                 !选择没有杀死的单元
eplot
esel,all                                    !选择所有单元
t=t+delt
time,t                                      !指定载荷步的结束时间
nsubst,1                                    !指定子步数
*do,j,1,4
   d,nelem(neorder(i),j),temp,max_tem       !给激活单元的节点施加温度约束
```

```
*enddo
solve                                          !求解
t=t+delt
time,t                                         !指定载荷步的结束时间
solve                                          !求解
*do,j,1,4
    ddele,nelem(neorder(i),j),temp             !删除激活单元节点上的温度约束
*enddo
t=t+dt-2*delt
time,t                                         !指定载荷步的结束时间
nsubst,nsub1                                   !指定子步数
solve                                          !求解
*enddo                                         !焊缝区单元循环分析结束
t=t+50000                                      !指定一个温度冷却的时间
time,t                                         !设置载荷步结束的时间
nsubst,nsub2                                   !指定子步数
solve                                          !最后一次求解
finish
!****************************************************************************
!****************************进入后处理***********************************
/post26                                        ! 进入时间历程后处理器
NSOL,2,52,TEMP,, TEMP_2
STORE,MERGE
NSOL,3,582,TEMP,, TEMP_3
STORE,MERGE
/AXLAB,X,TIME                                  !更改 X 坐标标示为 TIME
/AXLAB,Y,TEMPERATURE                           !更改 Y 坐标标示为 TEMPERATURE
plvar,2                                        !图形显示变量 2 号
plvar,3                                        !图形显示变量 3 号
finish
!*********生成节点 Von Mises 当量应力云图动画文件的程序段*******************
/post1                                         !进入通用后处理器
/seg,dele                                      !删除当前内存段中所有的数据
/dscale,1,1.0                                  !指定显示的比例
avprin,0,0                                     !指定公共节点上结果的计算方法
avres,1                                        !对所有公共子网格位置的结果进行平均
/seg,multi,von mises file,0.1                  !保存每幅画面到内存里
esel,all                                       !选中所有单元
*do,i,1,nse                                    !焊缝区的单元进行循环
esel,u,elem,,neorder(i)                        !按单元排序的顺序反选单元
*enddo                                         !反选掉所有焊缝单元
*do,i,1,nse
esel,a,elem,,neorder(i)                        !按单元排序的顺序再选单元
```



```
set,(i-1)*3+1,1                              !读入指定载荷步第一个子步的结果
plnsol,s,eqv                                 !显示节点的 Von Mises 应力云图
*do,j,1,nsub1
   set,(i-1)*3+3,j                           !读入指定载荷步中的子步结果
plnsol,s,eqv                                 !显示节点的 Von Mises 应力云图
*enddo
*enddo
*do,i,1,nsub2                                !对冷却时间的子步进行循环
set,(nse-1)*3+4,i                            !读入指定载荷步中的子步结果
plnsol,s,eqv                                 !显示节点的 Von Mises 应力云图
*enddo
/seg,off,von mises file,0.1                  !关闭内存段的存入
anim,1,1                                     !查看动画
finish
!*************生成节点温度分布云图动画文件的程序段***********************
/post1
/seg,dele                                    !删除当前内存段中所有的数据
/dscale,1,1.0                                !指定显示的比例
avprin,0,0                                   !指定公共节点上结果的计算方法
avres,1                                      !对所有公共子网格位置的结果进行平均
/seg,multi,temp file,0.1                     !保存每幅画面到内存里
esel,all                                     !选中所有单元
*do,i,1,nse                                  !焊缝区的单元进行循环
esel,u,elem,,neorder(i)                      !按单元排序的顺序反选单元
*enddo                                       !反选掉所有焊缝单元
*do,i,1,nse
esel,a,elem,,neorder(i)                      !按单元排序的顺序再选单元
set,(i-1)*3+1,1                              !读入指定载荷步第一个子步的结果
plnsol,temp                                  !显示节点的温度云图
*do,j,1,nsub1
  set,(i-1)*3+3,j                            !读入指定载荷步中的子步结果
plnsol,temp                                  !显示节点的温度云图
*enddo
*enddo
*do,i,1,nsub2                                !对冷却时间的子步进行循环
set,(nse-1)*3+4,i                            !读入指定载荷步中的子步结果
plnsol,temp                                  !显示节点的温度云图
*enddo
/seg,off,temp,0.1                            !关闭内存段的存入
anim,1,1                                     !查看动画
SET,LAST
PLNSOL, TEMP,, 0,1.0
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
```

```
finish
/EXIT,NOSAV
```

24.3 本章小结

本章主要介绍了工程分析中常用到的单元生死技术。首先对单元生死技术的定义、基本原理进行了简单介绍，然后详细讲解了单元生死技术的应用方法以及使用注意事项，并为单元生死技术的应用提供指导。最后通过一个实例的学习，帮助读者掌握单元生死技术的应用步骤和使用技巧。



第 25 章 接 触 分 析

本章主要讲解接触问题的基本形式、相关概念，以及问题的特点，最后以实例的形式讲解接触分析的分析过程。

学习目标：

（1）熟悉接触向导;
（2）了解刚体对柔体和柔体对柔体接触;
（3）掌握接触单元处理;
（4）能够创建接触对;
（5）能够应用软件分析接触问题。

25.1 概述

本节讲解接触问题的定义、分类，以及选择接触面和目标面的原则，最后介绍了 ANSYS 中的接触向导使用。

25.1.1 接触的定义及分类

1．定义

接触问题是高度非线性的，并且对于非线性问题的求解具有典型的挑战意义。接触问题提出两个重要的挑战：

（1）在多数接触问题中，接触区域是未知的，表面与表面会突然接触或突然不接触，这会导致系统刚度的突然变化。

（2）多数接触问题包括摩擦。摩擦是与路径有关的现象，这要求精确的加载历史。摩擦的响应还可能是杂乱的，使求解难以收敛。

2．分类

接触问题一般分为两类：刚体对柔体（简称刚对柔接触）和柔体对柔体（简称柔对柔接触）。

（1）刚体对柔体：一个或多个接触表面作为刚体（一个表面的刚度比另一个表面的刚度要高很多）。许多金属成形问题，接触时一个弹性模量很大、一个很小，则归入此类，如图 25-1 所示。

（2）柔体对柔体：两个或所有的接触体都可变形（所有表面刚度相差不多）。花键轴联接是一个柔体对柔体接触的例子，如图 25-2 所示。

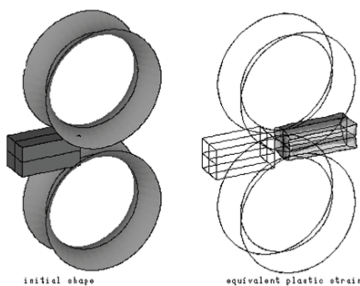


图 25-1　刚对柔接触



图 25-2　花键轴柔对柔接触

25.1.2 接触协调条件

接触协调条件：为了阻止接触表面相互穿过，必须在这两个表面间建立一个关系，否则这两个表面将相互穿过。

（1）用一个弹簧施加接触协调条件称为罚函数法。弹簧刚度或接触刚度称为罚参数。

该弹簧的变形量Δ满足方程：$F = k\Delta$，接触刚度（k）越大，接触表面的侵入越少。然而，若该值太大，会导致收敛困难。

（2）还可用拉格朗日乘子法，即增加一个附加自由度（接触压力），以满足不侵入条件。

将罚函数法和拉格朗日乘子法结合起来施加接触协调条件称为增强的拉格朗日法。在迭代的开始，接触协调条件基于惩罚刚度决定。一旦达到平衡，就检查许可侵入量。这时，如果有必要，接触压力增大，继续进行迭代。

25.1.3 接触单元

ANSYS 有以下 3 种类型的接触单元。

- 节点对节点：这是指接触的最终位置是事先知道的。
- 节点对面：接触区域未知，并且允许大滑动。
- 面对面：接触区域未知，并且允许大滑动（相对节点对面接触形式有几个优点）。

  面面接触的优点如下。
- 与低次单元和高次单元都兼容。
- 支持具有大滑动和摩擦的大变形。
- 提供更好的接触结果（易于进行接触压力和摩擦应力的后处理）。
- 能计算壳和梁的厚度及壳厚度的改变。
- 半自动接触刚度计算。
- “控制节点”对刚性面的控制（关于主控节点，后面有更多的叙述)，智能默认设置、接触向导（易于使用）。

25.1.4 选择接触面和目标面的原则

（1）如果凸面与平面或凹面接触，那么平面或凹面应该是目标面。

（2）如果一个表面网格粗糙，而另一个表面网格较细，那么网格粗糙的表面应该是目标面。

（3）如果一个表面比另一个表面的刚度大，那么刚度大的表面应该是目标面。

（4）如果一个表面划分为高次单元，而另一个表面划分为低次单元，那么划分为低次单元的表面应该是目标面。

（5）如果一个表面比另一个表面大，那么更大的表面应该是目标面。

对于刚对柔接触类型，很容易判定目标面和接触面（第三条）；对于柔对柔接触，判定接触面和目标面就要考虑其他原则。但是问题可能是多变的，具体的处理方法还要在实践中尝试。

包含摩擦的问题如下：

（1）包含摩擦的接触问题会产生不对称的刚度矩阵。然而，使用不对称的方程求解器比对称求解器的计算费用更高。由于这个原因，ANSYS 用一种对称算法进行计算。利用此算法可以解决多数包含摩擦的接触问题。

（2）如果遇到了一个收敛缓慢的问题，可以用不对称求解选项。在这种情况下，应该用稀疏矩阵求解器（优选的）或波前法求解器。

25.1.5 接触向导

ANSYS 提供了设置接触对的接触向导，执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Contact Pair 菜单命令，弹出接触对管理器，如图 25-3 所示。

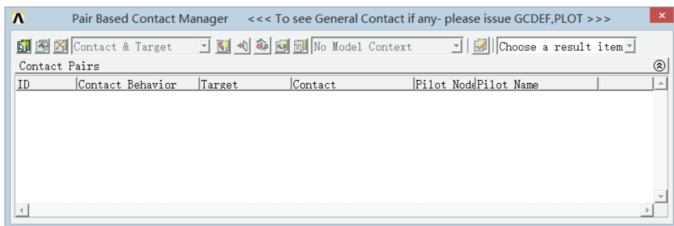


图 25-3　接触对管理器

单击按钮，弹出 Contact Wizard 对话框，如图 25-4 所示。首先定义目标面，接触形式包括点接触、面接触、体接触或是点组（Nodal Component）。接触类型有柔性（Flexible）、刚性的（Rigid）以及多点约束 MPC。

单击 Pick Target 按钮，选取目标面，选取完后单击 Next 按钮，弹出设置接触面的界面，如图 25-5 所示，其基本内容和定义目标面类似，在此就不再赘述。

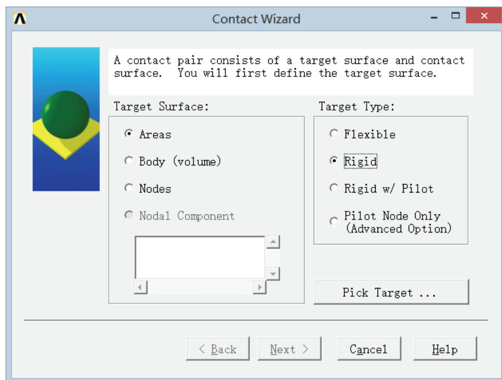


图 25-4　Contact Wizard 对话框

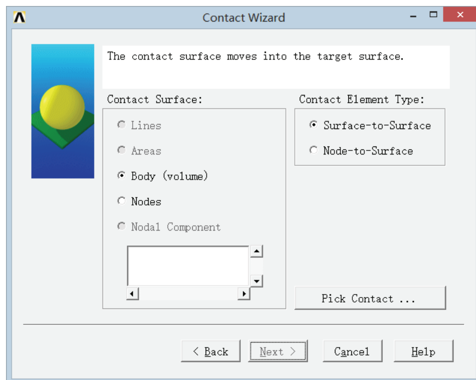


图 25-5　接触面设置界面

选取接触面后，单击 Next 按钮，弹出摩擦系数设置界面，如图 25-6 所示，设置完成后单击 Option settings 按钮，接触选项设置如图 25-7 所示。设置完成后单击 Create 按钮，完成接触的定义。

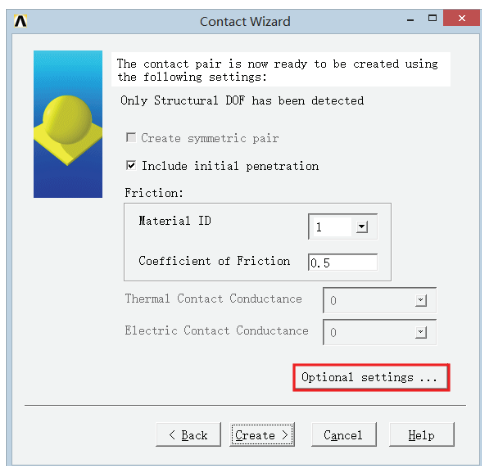


图 25-6　摩擦系数设置界面

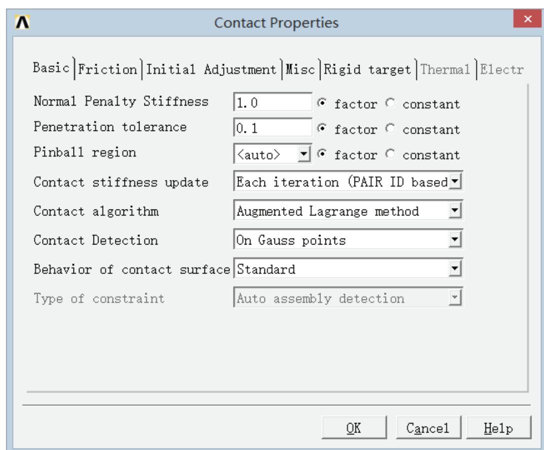


图 25-7　设置接触选项

MPC（Multi-point Constraint，多点约束）在接触问题上经常会用到，在此简单介绍。MPC 在有限元计算中应用很广泛，它允许在计算模型不同的自由度之间强加约束。简单来说，MPC 定义的是一种节点自由度的耦合关系，即以一个节点的某几个自由度为标准值，然后令其他指定的节点的某几个自由度与这个标准值建立某种关系。

MPC 常用于表征一些特定的物理现象，比如刚性连接、铰接、滑动等，多点约束也可用于不相容单元间的载荷传递，是一项重要的有限元建模技术。

MPC 对于处理接触链接时有以下几点注意事项。

（1）接触面节点上不能施加 MPC 以外的位移边界条件或其他约束耦合方程。因为接触点的一些自由度已在 MPC 约束删除，单独施加会产生约束过多现象。

（2）约束面时不宜过多，否则会引起对内存需求峰值过高，内存较少时应以考虑。

25.2　实例——轨道车辆车轮与钢轨接触

25.2.1　问题描述

东风系列机车车轮直径 1050 mm，轨道竖直截面高度 176 mm，取轨道有效计算厚度 25mm，计算时钢轨取 1200 mm，作用力在车轮 130 kN 竖直向下，轨道间摩擦系数为 0.24，结构简图如图 25-8 所示。

材料参数：

泊松比 0.3；

弹性模量 2e11 Pa；

密度 7850 kg/m^3。

试求出接触应力云图以及接触压力等。

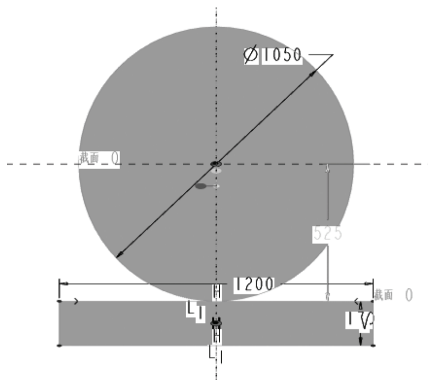


图 25-8 结构简图

25.2.2 问题分析

该问题属于典型的接触问题，可以通过 ANSYS 接触向导建立接触。模型比较简单，可直接采用 ANSYS 的模型定义模块建立。此问题为非线性分析问题，施加设定为 1.2 s，采用国际单位制。

25.2.3 GUI 操作步骤

1．定义分析文件名

执行 Utility Menu→File→Change Jobname 菜单命令，在弹出的对话框中输入“Exercise25-1”，单击 OK 按钮。

2．定义材料属性

执行 Main Menu→Preprocessor→Material Props→Material Models 菜单命令，打开 Define Material Model Behavior 对话框。

选中 Material Model Number 1，执行 Material Models Available→Structural→Linear→Elastic→Isotropic 菜单命令，弹出 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，依次输入“2e11”和“0.3”，如图 25-9 所示，单击 OK 按钮。

定义密度值。选择 Structural→Density，弹出 Density for Material Number 1 对话框，输入“7850”，如图 25-10 所示，单击 OK 按钮。

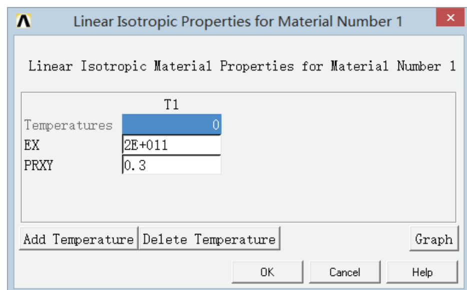


图 25-9 定义弹性模量和泊松比

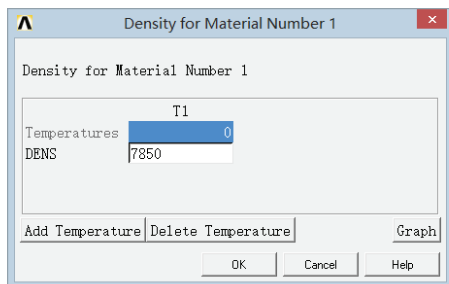


图 25-10 定义密度

3．定义单元

执行 Main Menu→Preprocessor→Element Type→Add/Edit/Delete 菜单命令，在弹出的

Element Types 对话框中单击 Add 按钮，弹出 Library of Element Types 对话框，选择 Solid 和 20node 186，20 节点 SOLID186 单元，如图 25-11 所示，单击 OK 按钮。

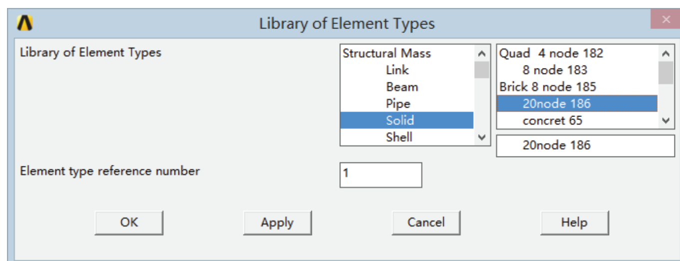


图 25-11 Library of Element Types 对话框

4．建立几何模型

（1）建立圆形机车车轮。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Cylinder→Partial Annulus 菜单命令，弹出 Partial Cylinder 对话框，依次输入“0”“1.05/2”“1.05/2”“-180”“0.025”，如图 25-12 所示，单击 OK 按钮。

（2）建立轨道长方体。执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Volumes→Block→By Dimension 菜单命令，弹出 Create Block by Dimensions 对话框，依次输入（-0.6,0.6）（0,-0.176）（0,0.025），如图 25-13 所示，单击 OK 按钮。

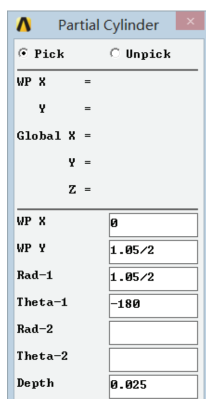


图 25-12 Partial Cylinder 对话框

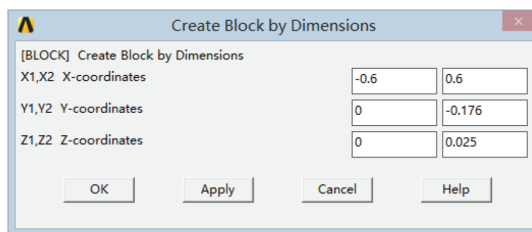


图 25-13 Create Block by Dimensions 对话框

模型建立完成后如图 25-14 所示。

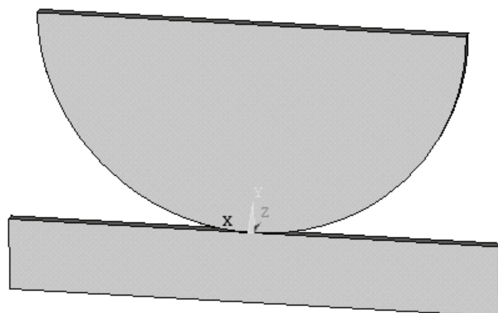


图 25-14 几何模型

5．设置单元尺寸并划分网格

（1）设置单元尺寸。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Size Cntrls→Manualsize→Global→Size 菜单命令，弹出 Global Element Sizes 对话框，SIZE 项设为 0.015，如图 25-15 所示，单击 OK 按钮。

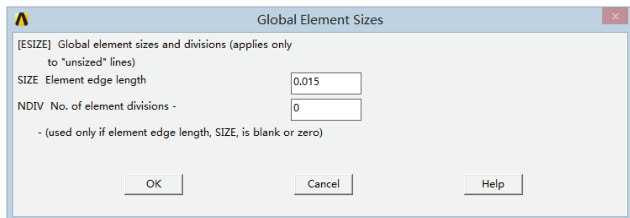


图 25-15　Global Element Sizes 对话框

（2）扫略划分单元。执行 Main Menu→Preprocessor→Meshing→Mesh→Volume Sweep→Sweep 菜单命令，弹出体拾取对话框，单击 Pick All 按钮，拾取所有模型，得有限元模型如图 25-16 所示。

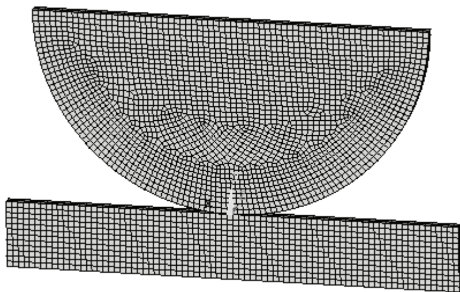


图 25-16　有限元模型效果

6．创建节点组件

（1）建立车轮圆形的节点组件。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Volumes、By Num/Pick、From Full，如图 25-17 所示，单击 OK 按钮，在弹出的对话框中拾取车轮的圆柱体，或者直接输入“1”，单击 OK 按钮。

继续执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、Attached to、Volumes,All、From Full，如图 25-18 所示，单击 OK 按钮，完成所有车轮节点的选取。

执行 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component 菜单命令，弹出 Create Component 对话框，Cname 项设为 CL，Entity 项选中 Nodes，如图 25-19 所示，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（2）建立轨道长方体的节点组件。

执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Volumes、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出体拾取对话框，拾取轨道长方体，或者直接输入“2”，单击 OK 按钮。



图 25-17　Select Entities 对话框 1

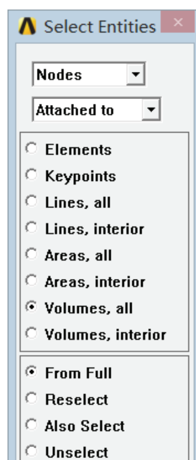


图 25-18　Select Entities 对话框 2

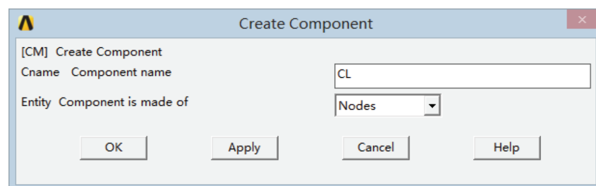


图 25-19　Create Component 对话框

继续执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，依次选中 Nodes、Attached to、Volumes,All、From Full，单击 OK 按钮，完成所有轨道长方体节点的选取。

执行 Utility Menu→Select→Comp/Assembly→Create Component 菜单命令，弹出 Create Component 对话框，Cname 项设为 GD，Entity 项选中 Nodes，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

（3）查看组件情况。执行 Utility Menu→Select→Component Manager 菜单命令，弹出 Component Manager 对话框，如图 25-20 所示。

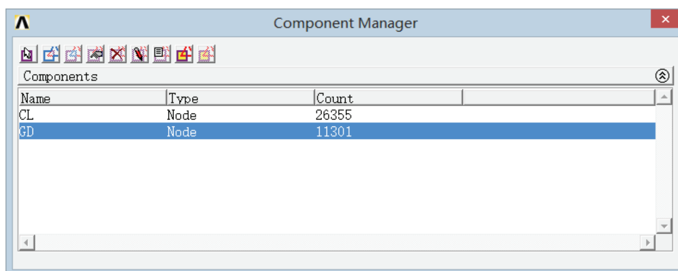


图 25-20　Component Manager 对话框

7．创建接触对，目标面为轨道点组 GD，接触面为 CL，摩擦系数 0.24

执行 Main Menu→Preprocessor→Modeling→Create→Contact Pair 菜单命令，弹出 Pair Based Contact Manager 对话框，如图 25-21 所示。

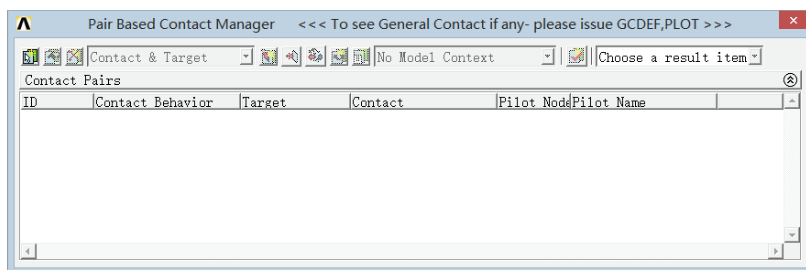


图 25-21　Pair Based Contact Manager 对话框

在 Pair Based Contact Manager 对话框中，单击按钮，弹出 Contact Wizard 对话框，如图 25-22 所示，Target Surface 项选中 Nodal Component，选中 GD 项；Target Type 项选中 Flexible，如图 25-22 所示，单击 Next 按钮，按图 25-23 所示进行接触面设置。

在图 25-23 所示的对话框中，Contact Surface 项选中 Nodal Component，选中 CL 项；Contact Element Type 项选中 Surface-to-Surface，单击 Next 按钮，弹出图 25-24 所示的摩擦系数设置界面。

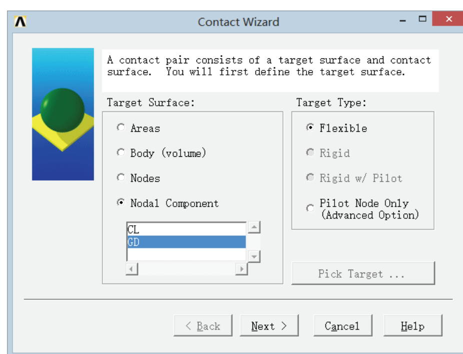


图 25-22　Contact Wizard 对话框

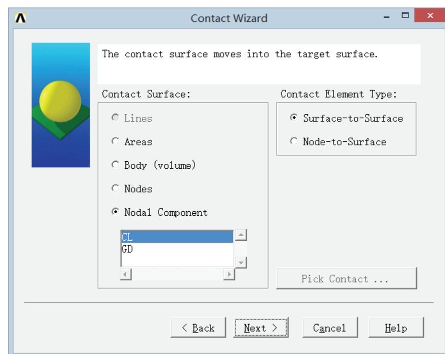


图 25-23　接触面设置

Coefficient of Friction 项设为 0.24，其他项保留默认设置，单击 Optional settings 按钮，弹出 Contact Properties 对话框（见图 25-25），设置接触刚度 Normal Penalty Stiffness 为 factor1.0，设置完成单击 OK 按钮，再单击 Create 按钮弹出完成接触定义对话框，如图 25-26 所示，单击 Finish 按钮结束。

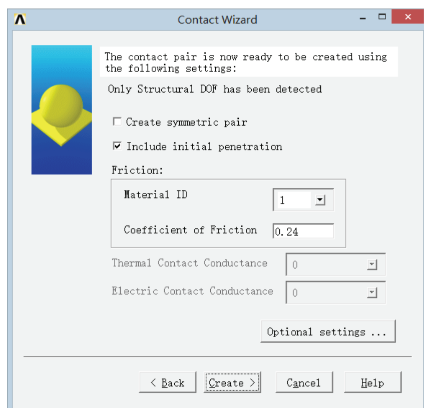


图 25-24　摩擦系数设置

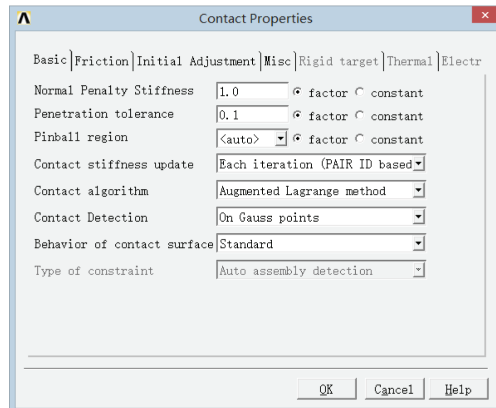


图 25-25　Contact Properties 对话框

8．施加边界条件

（1）添加约束条件。执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Displacement→on Areas 菜单命令，弹出面拾取对话框，拾取轨道模型的端面和底面，或者选中 List of Items 项，在文本框中输入“8,10,11”，单击 OK 按钮，弹出 Apply U,ROT on Areas 对话框，选中 All DOF，如图 25-27 所示，单击 OK 按钮。



图 25-26 完成接触定义对话框

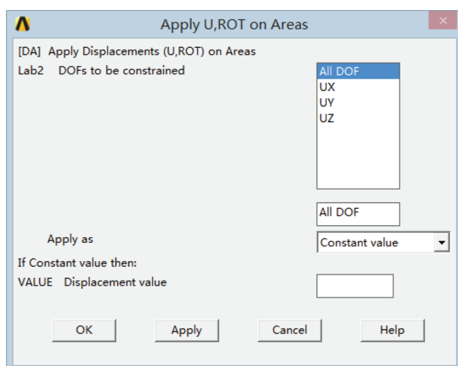


图 25-27 Apply U,ROT on Areas 对话框

（2）施加竖直向下载荷。选取车轮中心位置处的节点。执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，从上至下依次设置 Areas、By Num/Pick、From Full，单击 OK 按钮，弹出面拾取对话框，拾取欲施加载荷的面，即顶端面，单击 OK 按钮。

再次执行 Utility Menu→Select→Entities 菜单命令，弹出 Select Entities 对话框，从上至下依次设置 Node、Attached to、Areas,All、From Full，单击 OK 按钮。

执行 Utility Menu→Parameters→Get Scalar Data 菜单命令，弹出 Get Scalar Data 对话框，依次选中 Model data 和 For selected set，如图 25-28 所示，单击 OK 按钮，弹出 Get Data for Selected Entity Set 对话框，Name of parameter to be defined 项设为 Num_C，依次选中 Current node set 和 No. of nodes 项，如图 25-29 所示，单击 OK 按钮。

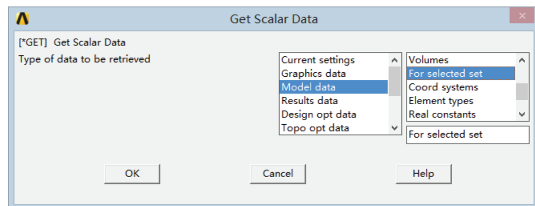


图 25-28 Get Scalar Data 对话框

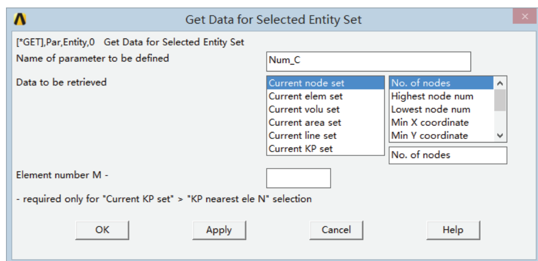


图 25-29 Get Data for Selected Entity Set 对话框

执行 Main Menu→Preprocessor→Loads→Define loads→Structural→Force/moment→On node 菜单命令，弹出节点拾取对话框，单击 Pick All 按钮，弹出 Apply F/M on Nodes 对话框，Lab 项选中 FY，VALUE 项设为-130e3/Num_C，如图 25-30 所示，单击 OK 按钮。

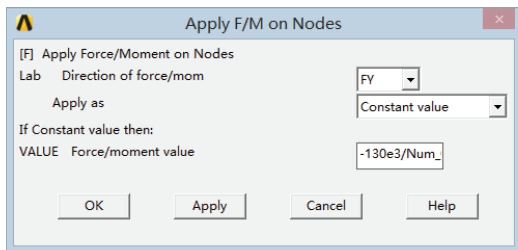


图 25-30 Apply F/M on Nodes 对话框

执行 Utility Menu→Select→Everything 菜单命令，选中所有模型。

9. 设置求解选项

执行 Main Menu→Solution→Analysis Type→New Analysis 菜单命令，弹出 New Analysis 对话框，选中 Static 单选按钮，单击 OK 按钮

10. 计算求解

执行 Main Menu→Solution→Solve→Current LS 菜单命令，弹出 Solve Current Load Stp 对话框，单击 OK 按钮开始求解。计算完成后出现 Note 提示框，单击 Close 关闭提示框。

11. 进行后处理

（1）设置图形显示。执行 Utility Menu→PlotCtrls→Window Controls→Window Options 菜单命令，弹出 Window Options 对话框，INF0 项选择 Legend ON，单击 OK 按钮。

（2）显示总位移分布云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中 Nodal Solution→DOF solution→Displacement vector sum，单击 OK 按钮，显示总位移分布云图如图 25-31 所示。

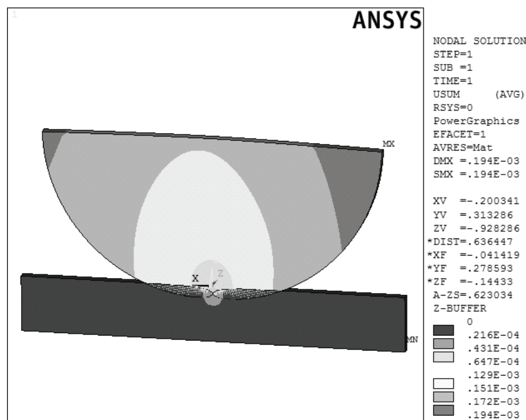


图 25-31 总位移分布云图

（3）显示 Y 方向位移分布云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，依次选中 Nodal Solution→DOF solution→Y-component of displacement，单击 OK 按钮，显示 Y 方向位移分布云图如图 25-32 所示。



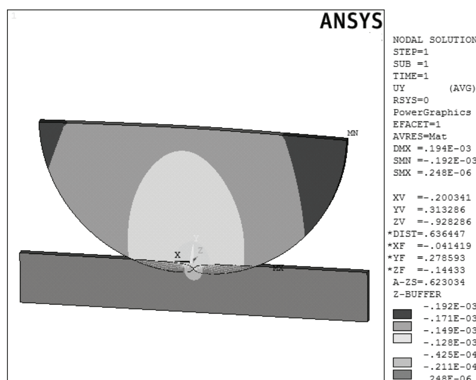


图 25-32 Y 方向位移分布云图

（4）显示等效应力分布云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Nodal Solution→Stress→von Miss stress，单击 OK 按钮，显示应力分布云图如图 25-33 所示。

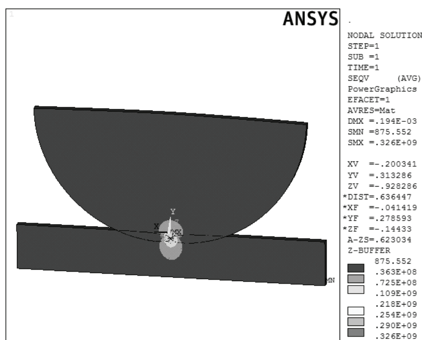


图 25-33 等效应力分布云图

（5）查看接触压力分布云图。执行 General Postproc→Plot Results→Contour Plot→Nodal Solu 菜单命令，弹出 Contour Nodal Solution Data 对话框，选中 Nodal Solution→Contact→Contact pressure，下方 Undisplaced shape key 项选择 Deformed shape with undeformed model，如图 25-34 所示，单击 OK 按钮，显示接触压力分布云图如图 25-35 所示。

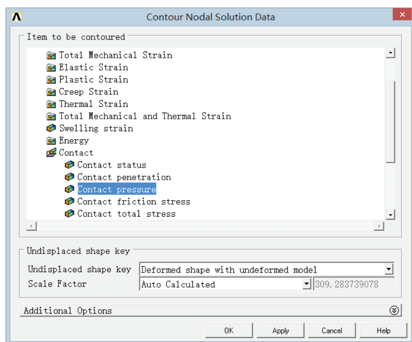


图 25-34 设置接触压力云图显示

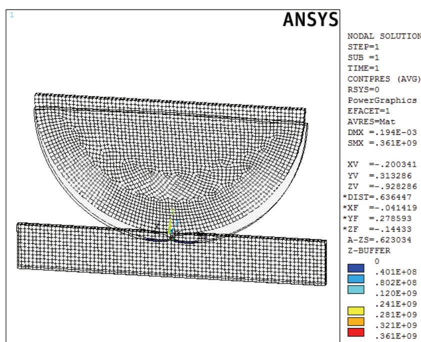


图 25-35 接触压力分布云图

12．保存并退出程序

单击 ANSYS 工具条中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框，选中 Save everything，单击 OK 按钮，退出 ANSYS 程序。



25.2.4 APDL 命令流程序

```
FINISH
/FILNAME,Exercise25-1
/PREP7
MP,EX,1,2.0E11
MP,PRXY,1,0.3
MP,DENS,1,7850
ET,1,SOLID186
CYL4,0,1.05/2,1.05/2,-180, , ,0.025
BLOCK,-0.6,0.6,0,-0.176,0,0.025,
ESIZE,0.015
VSWEEP,ALL
VSEL,S,,,1
ALLSEL,BELOW,VOLU
CM,CL,NODE
VSEL,S,,,2
ALLSEL,BELOW,VOLU
CM,GD,NODE
ALLSEL,ALL
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,0.24
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,0
```




```
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,2,5,0
! Generate the target surface
NSEL,S,,,GD
CM,_TARGET,NODE
TYPE,2
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
NSEL,S,,,CL
CM,_CONTACT,NODE
TYPE,3
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
```

```
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END
/MREP,EPLOT
/MREP,EPLOT
/SOLU
FLST,5,3,5,ORDE,3
FITEM,5,8
FITEM,5,10
FITEM,5,-11
ASEL,S, , ,P51X
DA,ALL,ALL,
ALLSEL,ALL
ASEL,S, , ,4,5
NSLA,S,1
*GET,Num_C,NODE,,COUNT, , , ,
F,ALL,FY,-130e3/Num_C
ALLSEL,ALL
/POST1
/EFACET,1
PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
/EFACET,1
PLNSOL, U,Y, 0,1.0
/EFACET,1
PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
/EFACET,1
PLNSOL, CONT,PRES, 1,1.0
FINISH
SAVE
/QUIT
```

25.3 本章小结

本章主要讲解了接触的定义和分类、接触问题的描述、接触单元的介绍、选择接触面和目标面的原则以及接触向导的使用，并通过一个接触问题的分析讲解，帮助读者掌握接触问题的求解方法和操作步骤。

在线互动交流平台
官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
豆瓣网：http://site.douban.com/139085/
读者信箱：cmp_itbook@163.com

ANSYS 16.0 有限元分析入门·进阶·精通

ANSYS系列已出版

SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

- ANSYS 16.0 有限元分析入门·进阶·精通
- ANSYS 15.0 有限元分析完全自学手册
- ANSYS Workbench 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版
- ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0 联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析—— ANSYS 13.0 从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析


机械工业出版社计算机分社官方微信

关注计算机分社官方微信，回复您购买图书书号中间的五位数字，即可获取本书配套资源下载链接，并可获得更多增值服务和最新资讯。

ISBN 978-7-111-53865-3

51CTO学院

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版


机械工业出版社微信公众号


机工IT互联网工厂微信服务号

上架指导 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-53865-3
策划编辑◎ 张淑谦 / 封面设计◎



定价：89.00元